

Sveučilište u Zagrebu
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Džepina Goran

Zagreb, 2011

Sveučilište u Zagrebu
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:
prof. dr. sc. Daniel Rolph Schneider

Džepina Goran

Zagreb, 2011

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se stečenim znanjem i navedenom literaturom.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Danielu Rolphu Schneideru na pomoći pri izradi rada.

Goran Džepina

SADRŽAJ

SADRŽAJ	4
POPIS SLIKA	8
POPIS TABLICA	8
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	8
POPIS OZNAKA	9
SAŽETAK	12
1. UVOD	13
1.1) NADKRITIČNI GENERATORI PARE	13
1.1.1 Osnove	13
1.1.2 Karakteristike nadkritičnog procesa	13
1.1.3 Parametri procesa	14
1.1.4 Razvoj nadkritičnih kotlova	14
1.1.5 Prednosti nadkritičnih postrojenja	15
1.1.6 Tipovi nadkritičnih kotlova	15
2. TERMODINAMIČKI PRORAČUN	16
2.1) GORIVO I IZGARANJE	17
2.1.1 Količina ugljika koji stvarno izgara	17
2.1.2 Teorijska količina kisika i zraka potrebnog za izgaranje	17
2.1.3 Stvarna količina zraka potrebnog za izgaranje	17
2.1.4 Teorijska količina suhih dimnih plinova	17
2.1.5 Stvarna količina suhih dimnih plinova	17
2.1.6 Količina vlažnih dimnih plinova	18
2.1.7 Ukupni volumen dimnih plinova	18
2.1.8 Udjeli dimnih plinova	18
2.1.9 Prirast pretička zraka	19
2.1.10 Entalpija plinova izgaranja	19
2.2) TOPLINSKA BILANCA GENERATORA PARE	22
2.2.1 Gubici na neizgorenim	22
2.2.2 Gubici zračenja na okolinu	22
2.2.3 Stupnjevi djelovanja ložišta i zračenja	22
2.2.4 Gubitak osjetne topline u dimnim plinovima	22
2.2.5 Stupanj djelovanja generatora pare	22
2.2.6 Veličine stanja	23
2.2.7 Količina vode za hlađenje	25
2.2.8 Količina goriva	25

2.2.9 Izmjenjena toplina u zagrijaču vode	25
2.2.10 Izmjenjena toplina u ložištu	25
2.2.11 Izmjenjena toplina u pregrijaču pare 1	26
2.2.12 Izmjenjena toplina u pregrijaču pare 2	26
2.2.13 Izmjenjena toplina u međupregrijaču pare 1	26
2.2.14 Izmjenjena toplina u međupregrijaču pare 2	26
2.2.15 Izmjenjena toplina u zagrijaču zraka	26
2.2.16 Ukupna izmjenjena toplina	27
2.2.17 Teorijska entalpija i temperatura plinova izgaranja	27
2.2.18 Izlazna temperatura dimnih plinova	27
2.3) PRORAČUN LOŽIŠTA	28
2.3.1 Skica ložišta	28
2.3.2 Površina ekrana	28
2.3.3 Stupanj ekranizacije	29
2.3.4 Efektivna površina ekrana	29
2.3.5 Proračun efektivne površine po normativnoj metodi	29
2.3.5.1 Distribucija temperature u ložištu	29
2.3.5.2 Efektivni stupanj crnoće plamena	29
2.3.5.3 Stupanj crnoće ložišta	30
2.3.5.4 Efektivna površina ekrana	31
2.4) PRORAČUN PREGRIJAČA PARE 2	32
2.4.1 Ogrjevna površina	32
2.4.2 Minimalni presjek	32
2.4.3 Srednja temperatura dimnih plinova	32
2.4.4 Brzina dimnih plinova	32
2.4.5 Koeficijent prijelaza topline konvekcijom	33
2.4.6 Koeficijent prijelaza topline zračenjem	34
2.4.7 Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova	34
2.4.8 Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija	35
2.4.9 Koeficijent prolaza topline	35
2.4.10 Srednja logaritamska temperaturna razlika	36
2.4.11 Potrebna ogrjevna površina	36
2.5) PRORAČUN MEĐUPREGRIJAČA PARE 2	37
2.5.1 Ogrjevna površina	37
2.5.2 Minimalni presjek	37
2.5.3 Srednja temperatura dimnih plinova	37
2.5.4 Brzina dimnih plinova	37
2.5.5 Koeficijent prijelaza topline konvekcijom	38
2.5.6 Koeficijent prijelaza topline zračenjem	39
2.5.7 Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova	39
2.5.8 Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija	40
2.5.9 Koeficijent prolaza topline	40
2.5.10 Srednja logaritamska temperaturna razlika	41
2.5.11 Potrebna ogrjevna površina	41

2.6) PRORAČUN PREGRIJAČA PARE 1	42
2.6.1 Ogrjevna površina.....	42
2.6.2 Minimalni presjek	42
2.6.3 Srednja temperatura dimnih plinova	42
2.6.4 Brzina dimnih plinova.....	42
2.6.5 Koeficijent prijelaza topline konvekcijom.....	43
2.6.6 Koeficijent prijelaza topline zračenjem.....	44
2.6.7 Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova	44
2.6.8 Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija	45
2.6.9 Koeficijent prolaza topline	45
2.6.10 Srednja logaritamska temperaturna razlika.....	46
2.6.11 Potrebna ogrjevna površina	46
2.7) PRORAČUN MEĐUPREGRIJAČA PARE 1	47
2.7.1 Ogrjevna površina.....	47
2.7.2 Minimalni presjek	47
2.7.3 Srednja temperatura dimnih plinova	47
2.7.4 Brzina dimnih plinova.....	47
2.7.5 Koeficijent prijelaza topline konvekcijom.....	48
2.7.6 Koeficijent prijelaza topline zračenjem.....	49
2.7.7 Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova	49
2.7.8 Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija	50
2.7.9 Koeficijent prolaza topline	50
2.7.10 Srednja logaritamska temperaturna razlika.....	51
2.7.11 Potrebna ogrjevna površina	51
2.8) PRORAČUN ZAGRIJAČA VODE	52
2.8.1 Ogrjevna površina.....	52
2.8.2 Minimalni presjek	52
2.8.3 Srednja temperatura dimnih plinova	52
2.8.4 Brzina dimnih plinova.....	52
2.8.5 Koeficijent prijelaza topline konvekcijom.....	53
2.8.6 Koeficijent prijelaza topline zračenjem.....	54
2.8.7 Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova	54
2.8.8 Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija	55
2.8.9 Koeficijent prolaza topline	55
2.8.10 Srednja logaritamska temperaturna razlika.....	55
2.8.11 Potrebna ogrjevna površina	56
2.9) PRORAČUN ZAGRIJAČA ZRAKA	57
2.9.1 Ogrjevna površina.....	57
2.9.2 Temperature radnih medija i topline koju je potrebno izmjeniti	57
2.9.3 Srednja logaritamska temperaturna razlika.....	57
2.9.4 Srednje temperature zraka i dimnih plinova.....	58
2.9.5 Temperature lima.....	58
2.9.6 Srednje brzine dimnih plinova i zraka	58
2.9.7 Koeficijent prolaza topline	58
2.9.8 Potrebna ogrjevna površina	59

3. HIDRODINAMIČKI PRORAČUN	60
3.1) PRORAČUN ZAGRIJAČA VODE	60
3.1.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi	60
3.1.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)	60
3.1.3 Ukupni pad tlaka	60
3.2) PRORAČUN EKRANA LOŽIŠTA	61
3.2.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi	61
3.2.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)	61
3.2.3 Ukupni pad tlaka	61
3.3) PRORAČUN PREGRIJAČA PARE 1	62
3.3.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi	62
3.3.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)	62
3.3.3 Ukupni pad tlaka	62
3.4) PRORAČUN PREGRIJAČA PARE 2	63
3.4.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi	63
3.4.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)	63
3.4.3 Ukupni pad tlaka	63
3.5) PRORAČUN MEĐUPREGRIJAČA PARE 1	64
3.5.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi	64
3.5.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)	64
3.5.3 Ukupni pad tlaka	64
3.6) PRORAČUN MEĐUPREGRIJAČA PARE 2	65
3.6.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi	65
3.6.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)	65
3.6.3 Ukupni pad tlaka	65
4. PRORAČUN ČVRSTOĆE	66
5. OBRADA DIMNIH PLINOVA	67
5.1) SUSTAV ZA SMANJENJE EMISIJE DUŠIKOVIH OKSIDA (De-NO _x)	67
5.2) SUSTAV ZA SMANJENJE EMISIJE PRAŠINE	67
5.3) SUSTAV ODSUMPORAVANJA DIMNIH PLINOVA	68
6. ZAKLJUČAK	69
PRILOZI	70
LITERATURA	70

POPIS SLIKA

Slika 1	Entalpije dimnih plinova u ovisnosti o λ
Slika 2	Shema generatora pare
Slika 3	T-s dijagram (skica)
Slika 4	T-s dijagram (stvarne vrijednosti)
Slika 5	Skica ložišta
Slika 6	Pregrijač pare 2
Slika 7	Međupregrijač pare 2
Slika 8	Pregrijač pare 1
Slika 9	Međupregrijač pare 1
Slika 10	Zagrijač vode
Slika 11	Zagrijač zraka
Slika 12	Dijagram temperature dimnih plinova i vode/zraka

POPIS TABLICA

Tabela 1	Entalpije dimnih plinova (komponente)
Tabela 2	Entalpije dimnih plinova u ovisnosti o λ
Tabela 3	Veličine stanja
Tabela 4	Svojstva dimnih plinova

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

1 Generator pare

POPIS OZNAKA

oznaka	jedinica	opis
D	kg / s	količina proizvedene pare
D_1	kg / s	količina međupregrijane pare
t	$^{\circ}C$	temperatura
T	K	temperatura
p	bar	tlak
p	Pa	tlak
$V_{O_2 \min}$	$\frac{m^3}{kg_B}$	teorijska količina kisika potrebnog za izgaranje
$V_{zr \min}$	$\frac{m^3}{kg_B}$	teorijska količina zraka potrebnog za izgaranje
V_{zr}	$\frac{m^3}{kg_B}$	stvarna količina zraka potrebnog za izgaranje
$V_{pl,s}^t$	$\frac{m^3}{kg_B}$	teorijska količina suhih dimnih plinova
V_{H_2O}	$\frac{m^3}{kg_B}$	količina vlažnih dimnih plinova
V_{pl}	$\frac{m^3}{kg_B}$	ukupni volumen dimnih plinova
r_{CO_2}		udio CO_2 u dimnim plinovima
r_{SO_2}		udio SO_2 u dimnim plinovima
h	$\frac{kJ}{kg_B}$	entalpija
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	gustoća
h_L	%	gubici na neizgorenom
h_Z	%	gubici zračenja na okolinu
η_L		stupanj djelovanja ložišta
η_Z		stupanj djelovanja zračenja
h_A	%	gubitak osjetne topline u dimnim plinovima
η_K		stupanj djelovanja generatora pare
B	$\frac{kg_B}{s}$	količina goriva

Q	kW	izmjenjena toplina
q	$\frac{kJ}{kg_B}$	izmjenjena toplina
a	m	duljina ekrana
b	m	širina ekrana
c	m	visina ekrana
F	m^2	površina
ψ_L		stupanj ekranizacije
F_{ef}	m^2	efektivna površina ekrana
x		bezdimenzijski položaj maksimalne temperature
ε_F		efektivni stupanj crnoće plamena
ε_L		stupanj crnoće ložišta
d	m	vanjski promjer cijevi
s	m	debljina stijenke cijevi
d_u	m	unutarnji promjer cijevi
L	m	duljina konvektivnog izmjenjivača topline
n_1		broj cijevi u jednom redu
n_2		broj redova cijevi
t_p	m	poprečni korak cijevi
t_u	m	uzdužni korak cijevi
f	m^2	minimalni presjek
w	$\frac{m}{s}$	brzina
σ_1		odnos poprečnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi
σ_2		odnos uzdužnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi
σ_{sr}		srednji relativni dijagonalni korak cijevi
Pr		Prandtlova značajka
λ	$\frac{W}{mK}$	koeficijent toplinske vodljivosti
ν	$\frac{m^2}{s}$	kinematička viskoznost
α	$\frac{W}{m^2 K}$	koeficijent prijelaza topline
C_c	$\frac{W}{m^2 K^4}$	koeficijent zračenja crnog tijela
k	$\frac{W}{m^2 K}$	koeficijent prolaza topline
Δt_m	$^{\circ}C$	srednja logaritamska temperaturna razlika
δ	mm	debljina lima zagrijača zraka
m_s		broj segmenata zagrijača zraka
z		broj limova u jednom segmentu
b	m	širina limova zagrijača zraka

l	m	dužina limova zagrijača zraka
F_o	m^2	poprečni presjek otvora zagrijača zraka
F_l	m^2	površina limova na poprečnom presjeku
λ		koeficijent trenja
ζ		koeficijent otpora strujanja zbog zakrivljenosti cijevi

SAŽETAK

Tema diplomskog rada je proračun nadkritičnog generatora pare.

Ovaj rad sastoji se od termodinamičkog i hidrodinamičkog proračuna, te tehničkog crteža kotla.

Termodinamički proračun obuhvaća dimenzioniranje ložišta i konvektivnih površina.

Hidrodinamički proračun predstavlja izračunavanje otpora strujanja, odnosno padova tlaka u svim izmjenjivačima topline.

Tehnički crtež prikazuje tip kotla, te raspored i smještaj izmjenjivačkih površina i ostalih dijelova generatora pare.

1. UVOD

1.1) NADKRITIČNI GENERATORI PARE

1.1.1 Osnove

Kod nadkritičnih kotlova voda se zagrijava na konstantnom tlaku većem od kritičnog tlaka (22.1 MPa), pa nema podjele na plin i tekućinu (gustoća obje faze je jednaka).

To je osnovna razlika u odnosu na podkritične kotlove gdje kod isparavanja vode postoje dvije faze (tekuća i plinovita) koje imaju različiti specifični volumen, i ostaju na istoj temperaturi (temperaturi zasićenja) tokom isparavanja.

Kod podkritičnih kotlova, nakon što je sva tekućina isparila, temperatura pregrijane pare se zagrijavanjem povećava pri konstantnom tlaku.

Zbog toga podkritični kotlovi obično imaju bubanj za odvajanje tekućine i pare gdje se tekućina odvodi na recirkulaciju kroz isparivač, a para odlazi u pregrijački dio.

U nadkritičnom kotlu svojstva vode kontinuirano se mijenjaju iz tekućeg u plinovito stanje (temperatura zagrijavanjem kontinuirano raste).

Budući da voda niti u jednom dijelu kotla nije podijeljena na dvije faze, konstrukcija kotla je bez bubnja.

Tipični nadkritični generatori pare su kotlovi sa jednim prolazom, gdje voda pumpana napojnom pumpom prolazi kroz izmjenjivačke elemente generatora pare i predaje se turbini na konačnoj temperaturi bez recirkulacije.

Stvarna lokacija prijelaza iz tekućine u paru u kotlu se slobodno pomiče za različite uvijete, pa je moguće postići dobar stupanj iskoristivosti za različita opterećenja.

1.1.2 Karakteristike nadkritičnog procesa

U procesu nadkritičnog generatora pare kondenzatna i napojna pumpa podižu tlak iznad kritičnog tlaka.

U T,s-dijagramu za nadkritično postrojenje linija procesa ne prelazi liniju zasićenja, a para na konačnoj temperaturi ekspandira u visokotlačnoj turbini.

Za paru koja izlazi iz visokotlačne turbine vrši se međupregrijanje prije ekspanzije u niskotlačnoj turbini čime se povećava učinkovitost postrojenja.

1.1.3 Parametri procesa

tipični parametri za podkritično postrojenje:

temperatura pregrijane pare	540 °C
tlak pregrijane pare	16.5 do 18 MPa
temperatura međupregrijane pare	540 do 560 °C
neto stupanj iskoristivosti postrojenja	36%

tipični parametri za nadkritično postrojenje:

temperatura pregrijane pare	540 °C
tlak pregrijane pare	25 MPa
temperatura međupregrijane pare	565 °C
neto stupanj iskoristivosti postrojenja	37.5%

1.1.4 Razvoj nadkritičnih kotlova

Porast u gradnji nadkritičnih kotlova baziran je na iskustvu u radu s tim kotlovima.

Prvi takvi kotlovi bili su instalirani 1960-tih u SAD-u, a od tada su napravljena mnoga poboljšanja.

U Sjedinjenim Američkim Državama postrojenja ovog tipa imaju ukupno 86 GW električne snage.

Većina od njih bila su izgrađena tokom 60-tih i 70-tih i rade s parametrima pare koji su tek malo iznad kritičnih.

U Japanu se dogodio najveći porast izgradnje nadkritičnih elektrana.

Europa također povećava korištenje postrojenja s nadkritičnim pritiskom pare kod ugljenom loženih kotlova.

Nova postrojenja na crni ugljen u fazi planiranja imaju temperature pare od oko 600 °C na tlaku od 30 MPa, što odgovara zadanim parametrima pare u ovom proračunu.

1.1.5 Prednosti nadkritičnih postrojenja

prednosti nadkritičnih kotlova u odnosu na podkritične kotlove:

- veća učinkovitost postrojenja što rezultira manjom emisijom CO₂ po MWh električne energije
- veća učinkovitost postrojenja u širem području djelomičnih opterećenja nego kod podkritičnih kotlova
- brže vrijeme pokretanja nego kod podkritičnih kotlova s bubnjem

ostale prednosti korištenja nadkritičnih kotlova:

- iskustvo stečeno radom s nadkritičnim kotlovima pokazuje da su pouzdani u radu
- korištenjem čelika proizvedenih modernim tehnologijama, cijene postrojenja s nadkritičnim kotlovima su konkurentne podkritičnim postrojenjima

1.1.6 Tipovi nadkritičnih kotlova

- 1.) Generator pare s jednim prolazom
- 2.) Generator pare s dva prolaza
- 3.) Horizontalni generator pare

Ekonomska procjena sva tri tipa pokazala je da je generator pare s jednim prolazom (toranjski tip) najbolje rješenje.

Proračun u nastavku izvršen je za toranjski tip generatora pare.

2. TERMODINAMIČKI PRORAČUN

Zadano:

proizvodnja pare: $D = 364 \text{ kg/s}$

temperatura napojne vode: $t_1 = 298 \text{ }^{\circ}\text{C}$

temperatura pregrijane pare: $t_6 = 603 \text{ }^{\circ}\text{C}$

tlak pregrijane pare: $p_6 = 308 \text{ bar}$

temperatura međupregrijane pare na ulazu u gen. pare: $t_7 = 320.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$

tlak međupregrijane pare na ulazu u gen. pare: $p_7 = 50 \text{ bar}$

temperatura međupregrijane pare na izlazu iz gen. pare: $t_{10} = 611.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

tlak međupregrijane pare na izlazu iz gen. pare: $p_{10} = 48 \text{ bar}$

toplinska vrijednost goriva: $H_d = 26300 \text{ kJ/kg}$

Sastav goriva (ugljen):

c	0.6548
h	0.0427
s	0.01017
o	0.08
n	0.01423
w	0.07626
a	0.12184

2.1) GORIVO I IZGARANJE

2.1.1 Količina ugljika koji stvarno izgara

$$c_0 = c \cdot \left(1 - \frac{h_L}{100}\right) = 0.6548 \cdot \left(1 - \frac{1}{100}\right) = 0.6483$$

gubici na neizgorenom: $h_L = 1 \%$

2.1.2 Teorijska količina kisika i zraka potrebnog za izgaranje

$$\begin{aligned} V_{O_2 \min} &= 1.87 \cdot c_0 + 5.5 \cdot h + 0.7 \cdot s - 0.7 \cdot o = \\ &= 1.87 \cdot 0.6483 + 5.5 \cdot 0.0427 + 0.7 \cdot 0.01017 - 0.7 \cdot 0.08 = 1.402 \frac{m^3}{kg_B} \end{aligned}$$

$$V_{zr \min} = \frac{V_{O_2 \min}}{0.21} = \frac{1.402}{0.21} = 6.678 \frac{m^3}{kg_B}$$

2.1.3 Stvarna količina zraka potrebnog za izgaranje

$$V_{zr} = \lambda \cdot V_{zr \min} = 1.25 \cdot 6.678 = 8.348 \frac{m^3}{kg_B}$$

2.1.4 Teorijska količina suhih dimnih plinova

$$\begin{aligned} V_{pl,s}^t &= 1.87 \cdot c_0 + 0.7 \cdot s + 0.8 \cdot n + 0.79 \cdot V_{zr \min} = \\ &= 1.87 \cdot 0.6483 + 0.7 \cdot 0.01017 + 0.8 \cdot 0.01423 + 0.79 \cdot 6.678 = 6.507 \frac{m^3}{kg_B} \end{aligned}$$

2.1.5 Stvarna količina suhih dimnih plinova

$$V_{pl,s} = V_{pl,s}^t + (\lambda - 1) \cdot V_{zr \min} = 6.507 + (1.25 - 1) \cdot 6.678 = 8.176 \frac{m^3}{kg_B}$$

2.1.6 Količina vlažnih dimnih plinova

$$V_{H_2O} = 11.2 \cdot h + 1.24 \cdot w = 11.2 \cdot 0.0427 + 1.24 \cdot 0.07626 = 0.573 \frac{m^3}{kg_B}$$

2.1.7 Ukupni volumen dimnih plinova

$$V_{pl} = V_{pl,s} + V_{H_2O} = 8.176 + 0.572 = 8.749 \frac{m^3}{kg_B}$$

2.1.8 Udjeli dimnih plinova

$$V_{CO_2} = 1.87 \cdot c_0 = 1.87 \cdot 0.6483 = 1.212 \frac{m^3}{kg_B}$$
$$r_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{pl}} = \frac{1.212}{8.749} = 0.139$$

$$V_{SO_2} = 0.7 \cdot s = 0.7 \cdot 0.01017 = 0.0071 \frac{m^3}{kg_B}$$
$$r_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{pl}} = \frac{0.0071}{8.749} = 0.0008$$

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} = 1.212 + 0.0071 = 1.219 \frac{m^3}{kg_B}$$

$$V_{N_2 \min} = 0.8 \cdot n + 0.79 \cdot V_{zr \min} = 0.8 \cdot 0.01423 + 0.79 \cdot 6.6784 = 5.287 \frac{m^3}{kg_B}$$

r_{CO_2}	0.138555
r_{SO_2}	0.000814
r_{O_2}	0.040075
r_{N_2}	0.755087
r_{H_2O}	0.06547
Σ	1

2.1.9 Prirast pretička zraka

po pregrijaču pare: $\Delta\lambda_1 = 0.02$

po zagrijaču vode: $\Delta\lambda_2 = 0.02$

po zagrijaču zraka: $\Delta\lambda_3 = 0.02$

na izlazu iz pregrijača pare 2: $\lambda_1 = \lambda + \Delta\lambda_1 = 1.25 + 0.02 = 1.27$

na izlazu iz međupregrijača pare 2: $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda_1 = 1.27 + 0.02 = 1.29$

na izlazu iz pregrijača pare 1: $\lambda_3 = \lambda_2 + \Delta\lambda_1 = 1.29 + 0.02 = 1.31$

na izlazu iz međupregrijača pare 1: $\lambda_4 = \lambda_3 + \Delta\lambda_1 = 1.31 + 0.02 = 1.33$

na izlazu iz zagrijača vode: $\lambda_5 = \lambda_4 + \Delta\lambda_2 = 1.33 + 0.02 = 1.35$

na izlazu iz zagrijača zraka: $\lambda_6 = \lambda_5 + \Delta\lambda_3 = 1.35 + 0.02 = 1.37$

2.1.10 Entalpija plinova izgaranja

$$h_{pl\ n} \left[\frac{kJ}{kg_B} \right] = V_{RO_2} \cdot h_{CO_2\ n} + V_{N_2\ min} \cdot h_{N_2\ n} + V_{H_2O} \cdot h_{H_2O\ n} + (\lambda - 1) \cdot V_{zr\ min} \cdot h_{zr\ n}$$

$$h_{pl\ n} \left[\frac{kJ}{kg_G} \right] = \frac{h_{pl\ n} \left[\frac{kJ}{kg_B} \right]}{V_{pl} \cdot \rho_{pl}}$$

$$\begin{aligned} \rho_{pl} &= \frac{V_{RO_2} \cdot 44 + V_{N_2\ min} \cdot 28 + V_{H_2O} \cdot 18 + (\lambda - 1) \cdot V_{zr\ min} \cdot 29}{V_{pl} \cdot 22.41} = \\ &= \frac{1.2193 \cdot 44 + 5.2873 \cdot 28 + 0.5728 \cdot 18 + (1.25 - 1) \cdot 6.6784 \cdot 29}{8.7491 \cdot 22.41} = 1.328 \frac{kg}{m^3} \end{aligned}$$

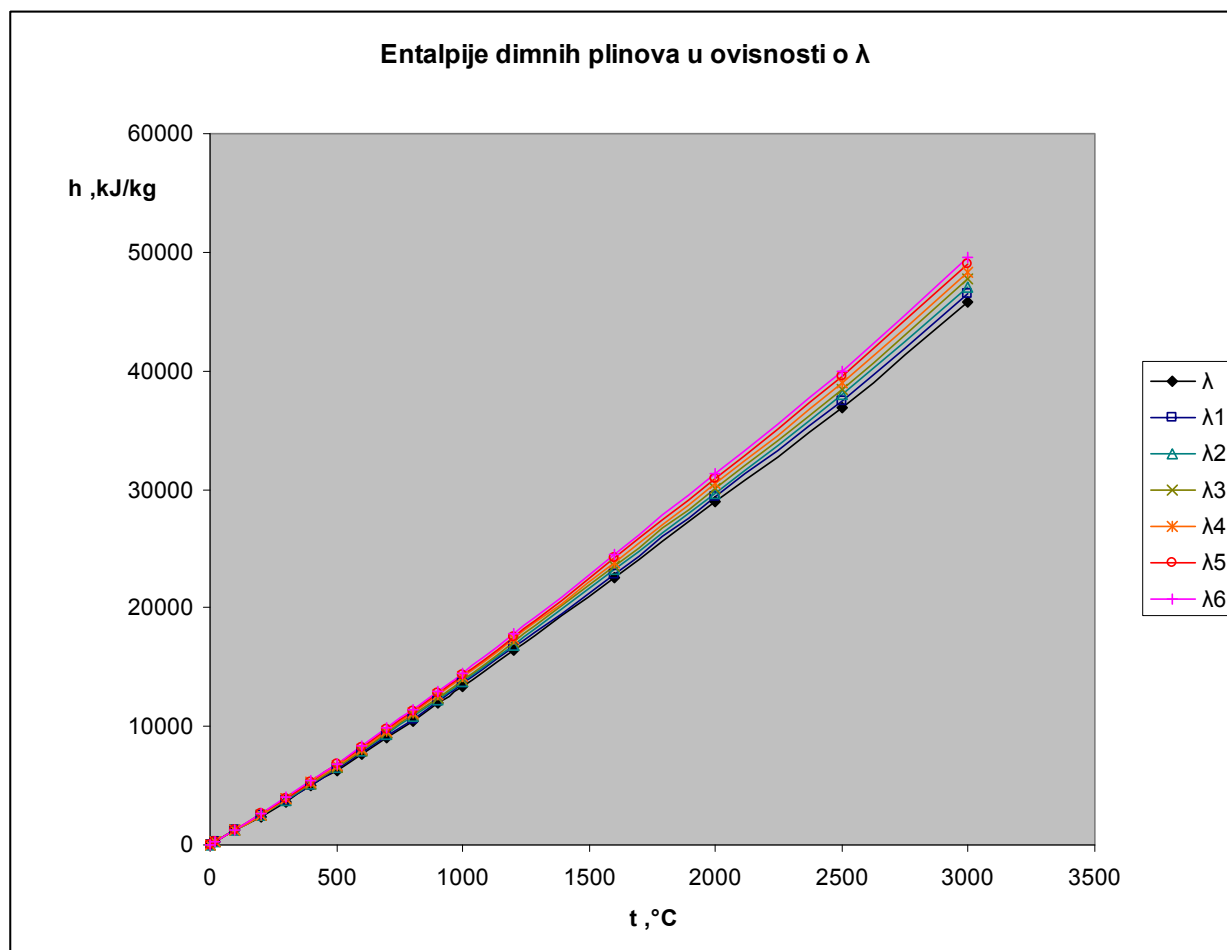
$\rho_{pl}, kg/m^3$	1.328248
$\rho_{pl1}, kg/m^3$	1.348004
$\rho_{pl2}, kg/m^3$	1.36776
$\rho_{pl3}, kg/m^3$	1.387515
$\rho_{pl4}, kg/m^3$	1.407271
$\rho_{pl5}, kg/m^3$	1.427027
$\rho_{pl6}, kg/m^3$	1.446783

Tabela 1 Entalpije dimnih plinova (komponente)

Tablica: Entalpije dimnih plinova (kJ/m ³)				
T	CO ₂	N ₂	H ₂ O	Zrak
0	0	0	0	0
20	32.45	25.96	29.94	25.96
100	170.03	130.04	150.52	130.04
200	357.47	260.75	304.46	261.42
300	558.94	393.27	462.64	395.15
400	772.05	528.37	626.35	531.72
500	994.37	666.12	795.07	671.56
600	1,224.64	807.22	968.83	813.91
700	1,462.03	951.24	1,148.86	959.61
800	1,704.86	1,097.36	1,334.33	1,107.41
900	1,952.30	1,245.99	1,526.09	1,257.71
1000	2,203.51	1,397.14	1,722.87	1,409.70
1200	2,716.40	1,704.03	2,132.34	1,719.10
1600	3,768.54	2,333.72	3,001.94	2,353.40
2000	4,844.13	2,977.65	3,925.54	3,001.94
2500	6,204.84	3,794.50	5,132.60	3,825.90
3000	7,932.95	4,655.41	6,339.59	4,725.06

Tabela 2 Entalpije dimnih plinova u ovisnosti o λ

	$h_{pl,\lambda}$	$h_{pl,\lambda 1}$	$h_{pl,\lambda 2}$	$h_{pl,\lambda 3}$	$h_{pl,\lambda 4}$	$h_{pl,\lambda 5}$	$h_{pl,\lambda 6}$
T	kJ/kg _B	kJ/kg _B	kJ/kg _B	kJ/kg _B	kJ/kg _B	kJ/kg _B	kJ/kg _B
0	0	0	0	0	0	0	0
20	237.3201	240.7875	244.2549	247.7224	251.1898	254.6573	258.1247
100	1198.226	1215.595	1232.965	1250.334	1267.703	1285.073	1302.442
200	2425.42	2460.338	2495.255	2530.173	2565.09	2600.008	2634.925
300	3685.644	3738.423	3791.203	3843.983	3896.762	3949.542	4002.322
400	4981.611	5052.633	5123.654	5194.675	5265.696	5336.717	5407.738
500	6311.15	6400.849	6490.549	6580.248	6669.947	6759.647	6849.346
600	7675.173	7783.886	7892.598	8001.311	8110.024	8218.737	8327.45
700	9072.501	9200.675	9328.849	9457.022	9585.196	9713.37	9841.544
800	10494.19	10642.1	10790.02	10937.93	11085.85	11233.76	11381.68
900	11942.54	12110.54	12278.53	12446.52	12614.51	12782.5	12950.49
1000	13414.52	13602.81	13791.1	13979.39	14167.69	14355.98	14544.27
1200	16413.67	16643.28	16872.9	17102.52	17332.14	17561.76	17791.37
1600	22583.12	22897.46	23211.8	23526.14	23840.48	24154.82	24469.16
2000	28911.17	29312.13	29713.1	30114.06	30515.03	30915.99	31316.96
2500	36956.41	37467.43	37978.45	38489.47	39000.49	39511.52	40022.54
3000	45808.12	46439.24	47070.36	47701.48	48332.6	48963.72	49594.84



Slika 1 Entalpije dimnih plinova u ovisnosti o λ

2.2) TOPLINSKA BILANCA GENERATORA PARE

2.2.1 Gubici na neizgorenom

$$h_L = 1 \%$$

2.2.2 Gubici zračenja na okolinu

$$h_Z = 0.3 \%$$

2.2.3 Stupnjevi djelovanja ložišta i zračenja

$$\eta_L = 1 - \frac{h_L}{100} = 1 - \frac{1}{100} = 0.99$$

$$\eta_Z = 1 - \frac{h_Z}{100} = 1 - \frac{0.3}{100} = 0.997$$

2.2.4 Gubitak osjetne topline u dimnim plinovima

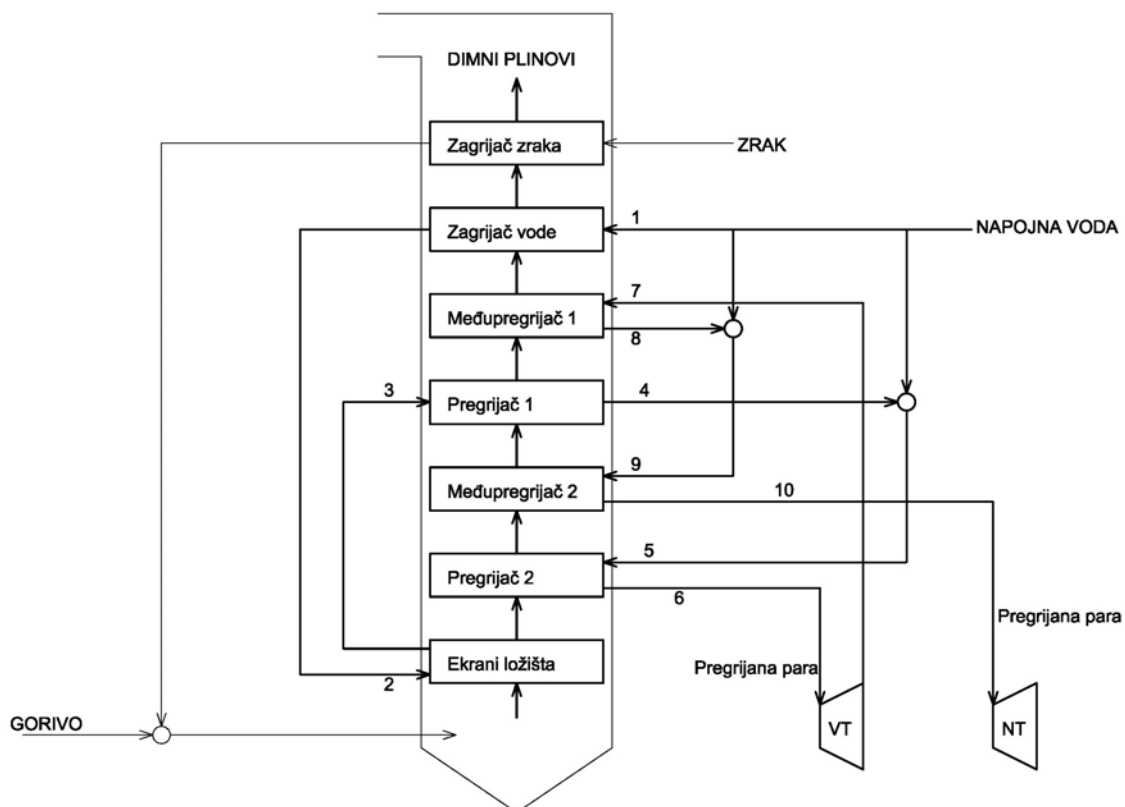
$$\text{za pretpostavljenu izlaznu temperaturu } t_{izl} = 130 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow h_{pl\ iz} = 1702.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

$$h_A = \frac{h_{pl\ iz}}{H_d + V_{zr} \cdot h_{zr_2}} = \frac{1702.2}{26300 + 8.348 \cdot 314.91} = 0.05884 = 5.884 \%$$

2.2.5 Stupanj djelovanja generatora pare

$$\eta_K = 1 - \frac{h_L + h_Z + h_A}{100} = 1 - \frac{1 + 0.3 + 5.884}{100} = 0.928$$

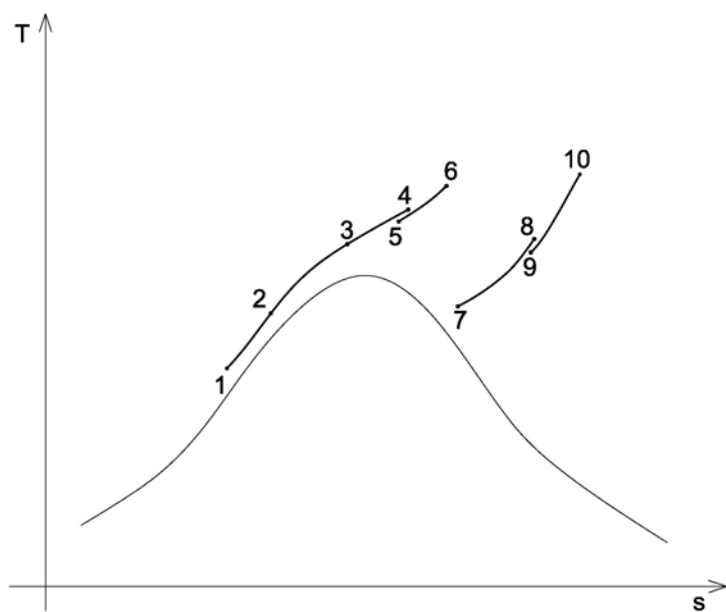
2.2.6 Veličine stanja



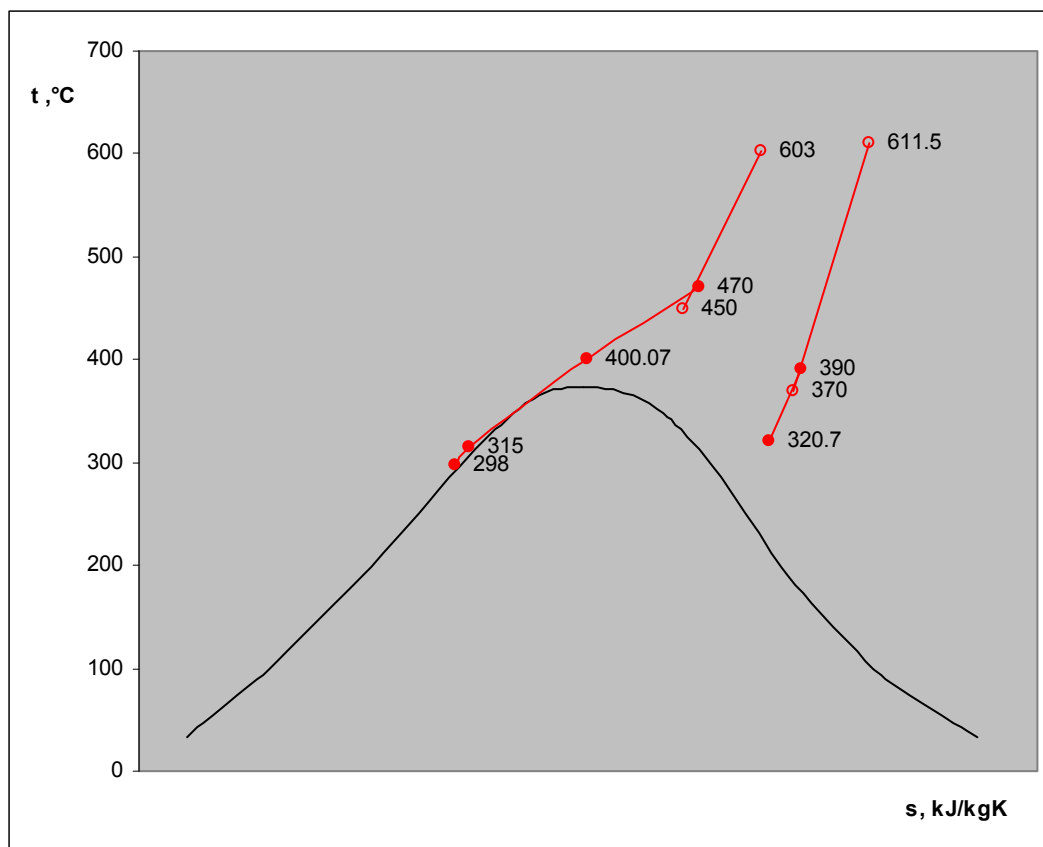
Slika 2 Shema generatora pare

Tabela 3 Veličine stanja

stanje	t, °C	p, bar	h, kJ/kg
1	298	338	1319.96
2	315	334	1407.986
3	400.07	333	2163.146
4	470	317	2940.38
5	450	317	2825.406
6	603	308	3451.885
7	320.7	50	2988.925
8	390	49	3175.373
9	370	49	3125.527
10	611.5	48	3692.939



Slika 3 T-s dijagram (skica)



Slika 4 T-s dijagram (stvarne vrijednosti)

2.2.7 Količina vode za hlađenje

količina vode za hlađenje između pregrijača 1 i pregrijača 2:

$$w_a = \frac{D \cdot (h_4 - h_5)}{h_4 - h_1} = \frac{364 \cdot (2940.38 - 2825.406)}{2940.38 - 1319.96} = 25.82 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$D_a = D - w_a = 364 - 25.82 = 338.17 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

količina vode za hlađenje između međupregrijača 1 i međupregrijača 2:

$$w_{1a} = \frac{D_1 \cdot (h_8 - h_9)}{h_8 - h_1} = \frac{308 \cdot (3175.37 - 3125.52)}{3175.37 - 1319.96} = 8.27 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$D_{1a} = D_1 - w_{1a} = 308 - 8.27 = 299.72 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

količina međupregrijane pare: $D_1 = 308 \text{ kg/s}$

2.2.8 Količina goriva

$$\begin{aligned} B &= \frac{D \cdot (h_4 - h_1) + D_a \cdot (h_6 - h_5) + D_1 \cdot (h_8 - h_7) + D_{1a} \cdot (h_{10} - h_9) + Q_{zz}}{\eta_K \cdot (H_d + V_{zr} \cdot h_{zr2})} = \\ &= \frac{364 \cdot (2940.3 - 1319.9) + 338.17 \cdot (3451.8 - 2825.4) + 308 \cdot (3175.3 - 2988.9) + 299.72 \cdot (3692.9 - 3125.5) + 99360}{0.92816 \cdot (26300 + 8.348 \cdot 314.91)} = \\ &= 41.192 \frac{\text{kg}_B}{\text{s}} \end{aligned}$$

2.2.9 Izmjenjena toplina u zagrijaču vode

$$Q_{zv} = D_a \cdot (h_2 - h_1) = 338.17 \cdot (1407.98 - 1319.96) = 29.77 \cdot 10^3 \text{ kW}$$

$$q_{zv} = \frac{Q_{zv}}{\eta_Z \cdot B} = \frac{29.77 \cdot 10^3}{0.997 \cdot 41.192} = 724.84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

2.2.10 Izmjenjena toplina u ložištu

$$Q_L = D_a \cdot (h_3 - h_2) = 338.17 \cdot (2163.14 - 1407.98) = 255.37 \cdot 10^3 \text{ kW}$$

$$q_L = \frac{Q_L}{\eta_Z \cdot B} = \frac{255.37 \cdot 10^3}{0.997 \cdot 41.192} = 6218.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

2.2.11 Izmjenjena toplina u pregrijaču pare 1

$$Q_{pr1} = D_a \cdot (h_4 - h_3) = 338.17 \cdot (2940.38 - 2163.14) = 262.83 \cdot 10^3 \text{ kW}$$

$$q_{pr1} = \frac{Q_{pr1}}{\eta_Z \cdot B} = \frac{262.83 \cdot 10^3}{0.997 \cdot 41.192} = 6400.07 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

2.2.12 Izmjenjena toplina u pregrijaču pare 2

$$Q_{pr2} = D \cdot (h_6 - h_5) = 364 \cdot (3451.88 - 2825.41) = 228.03 \cdot 10^3 \text{ kW}$$

$$q_{pr2} = \frac{Q_{pr2}}{\eta_Z \cdot B} = \frac{228.03 \cdot 10^3}{0.997 \cdot 41.192} = 5552.66 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

2.2.13 Izmjenjena toplina u međupregrijaču pare 1

$$Q_{mp1} = D_{1a} \cdot (h_8 - h_7) = 299.72 \cdot (3175.37 - 2988.92) = 55.88 \cdot 10^3 \text{ kW}$$

$$q_{mp1} = \frac{Q_{mp1}}{\eta_Z \cdot B} = \frac{55.88 \cdot 10^3}{0.997 \cdot 41.192} = 1360.74 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

2.2.14 Izmjenjena toplina u međupregrijaču pare 2

$$Q_{mp2} = D_1 \cdot (h_{10} - h_9) = 308 \cdot (3692.93 - 3125.52) = 174.76 \cdot 10^3 \text{ kW}$$

$$q_{mp2} = \frac{Q_{mp2}}{\eta_Z \cdot B} = \frac{174.76 \cdot 10^3}{0.997 \cdot 41.192} = 4255.42 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

2.2.15 Izmjenjena toplina u zagrijaču zraka

$$q_{zz} = \frac{V_{zr} \cdot (h_{zr2} - h_{zr1})}{\eta_Z} = \frac{8.348 \cdot (314.91 - 25.96)}{0.997} = 2419.44 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

zrak	t, °C	h _{zr} , kJ/m ³
1	20	25.96
2	240	314.912

2.2.16 Ukupna izmjenjena toplina

$$\begin{aligned} q &= q_L + q_{pr1} + q_{pr2} + q_{mp1} + q_{mp2} + q_{zv} + q_{zz} = \\ &= 6218.3 + 6400.07 + 5552.66 + 1360.74 + 4255.42 + 724.84 + 2419.44 = 26931.48 \frac{kJ}{kg_B} \end{aligned}$$

2.2.17 Teorijska entalpija i temperatura plinova izgaranja

$$\text{za } t_{zr2} = 240^\circ C \rightarrow h_{zr2} = 314.91 \frac{kJ}{m^3}$$

$$h_{pl t} = \eta_L \cdot H_d + V_{zr} \cdot h_{zr2} = 0.99 \cdot 26300 + 8.348 \cdot 314.91 = 28665.9 \frac{kJ}{kg_B}$$

$$\text{za } h_{pl t} = 28665.9 \rightarrow t_{pl t} = 1984.49^\circ C$$

$$T_{pl t} = t_{pl t} + 273.15 = 1984.49 + 273.15 = 2257.64 K$$

2.2.18 Izlazna temperatura dimnih plinova

$$h_{pl iz} = h_{pl t} - q = 28665.9 - 26931.48 = 1734.41 \frac{kJ}{kg_B}$$

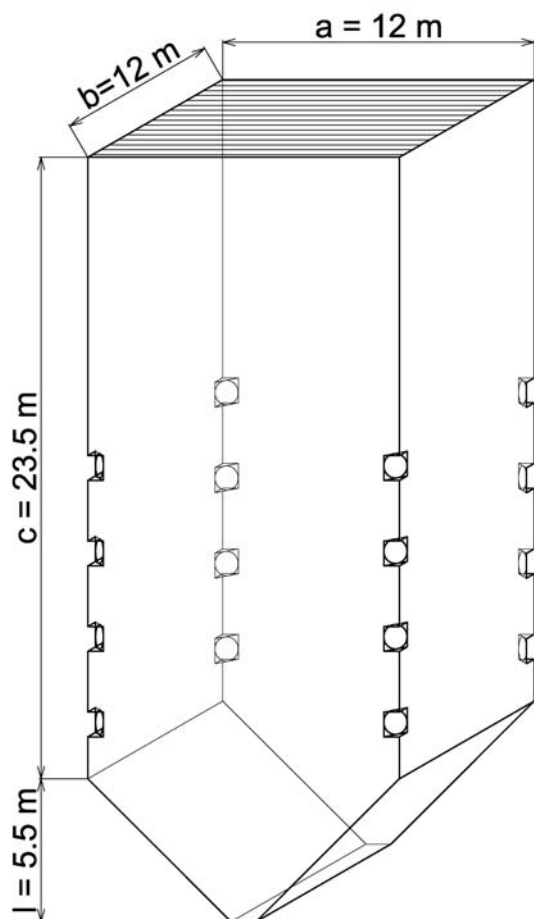
$$\text{za } h_{pl iz} = 1734.41 \frac{kJ}{kg_B} \rightarrow t_{pl iz} = 132.41^\circ C$$

provjera pogreške u pretpostavljenoj izlaznoj temperaturi dimnih plinova:

$$\frac{t_{pl iz} - t_{izl}}{t_{pl iz}} \cdot 100 = \frac{132.41 - 130}{132.41} \cdot 100 = 1.826 \% \quad \text{zadovoljava}$$

2.3) PRORAČUN LOŽIŠTA

2.3.1 Skica ložišta



Slika 5 Skica ložišta

2.3.2 Površina ekrana

$$a = 12\text{ m} \quad b = 12\text{ m} \quad c = 23.5\text{ m} \quad l = 5.5\text{ m} \quad d = 1\text{ m}$$

$$\begin{aligned} F_L &= 2 \cdot a \cdot (c + l) + 2 \cdot b \cdot c + 2\sqrt{2} \cdot b \cdot l - 2 \cdot l^2 - 16 \cdot d^2 \cdot \pi = \\ &= 2 \cdot 12 \cdot (23.5 + 5.5) + 2 \cdot 12 \cdot 23.5 + 2\sqrt{2} \cdot 12 \cdot 5.5 - 2 \cdot 5.5^2 - 16 \cdot 1^2 \cdot \pi = 1335.91\text{ m}^2 \end{aligned}$$

2.3.3 Stupanj ekranizacije

jednoredni ekran:

debljina stijenke cijevi: $s_L = 5 \text{ mm}$

korak: $t_L = 40 \text{ mm}$

promjer cijevi: $d_L = 30 \text{ mm}$

očitano iz sl. 4.26/1 (Kreuh: Generatori pare)

$$\text{za } \frac{t_L}{d_L} = \frac{40}{30} = 1.333 \rightarrow \psi_L = 0.97$$

2.3.4 Efektivna površina ekrana

$$F_{ef} = F_L \cdot \psi_L = 1335.91 \cdot 0.97 = 1295.83 \text{ m}^2$$

2.3.5 Proračun efektivne površine po normativnoj metodi

2.3.5.1 Distribucija temperature u ložištu

za izgaranje krutog goriva u prostoru: $M = 0.59 - 0.5x = 0.59 - 0.5 \cdot 0.4827 = 0.3486$

bezdimenzijski položaj maksimalne temperature: $x = \frac{h_1}{h_2} = \frac{14}{29} = 0.4827$

udaljenost od dna ložišta do sredine polja maksimalnih temperatura: $h_1 = 14 \text{ m}$

udaljenost od dna ložišta do sredine izlaznog otvora ložišta: $h_2 = 29 \text{ m}$

2.3.5.2 Efektivni stupanj crnoće plamena

$$\varepsilon_F = \varepsilon_{sv} \cdot m + \varepsilon_{nsv} \cdot (1 - m) = 0.8 \cdot 0.55 + 0.2737 \cdot (1 - 0.55) = 0.5631$$

stupanj crnoće svjetlećeg plamena:

$$\text{za } s > 2.5 \text{ m} \rightarrow \varepsilon_{sv} = 0.8$$

efektivna debljina sloja dimnih plinova:

$$s = 3.6 \cdot \frac{V_L}{F} = 3.6 \cdot \frac{3813}{1479.91} = 9.275 \text{ m} > 2.5 \text{ m}$$

$$V_L = a \cdot b \cdot (c + l) - l^2 \cdot b = 12 \cdot 12 \cdot (23.5 + 5.5) - 5.5^2 \cdot 12 = 3813 \text{ m}^3$$

$$F = F_L + F_{CZ} = 1335.91 + 144 = 1479.91 \text{ m}^2$$

$$F_{CZ} = a \cdot b = 12 \cdot 12 = 144 \text{ m}^2$$

$$\text{za } q_l < 400 \text{ kW/m}^3 \rightarrow m = 0.55$$

$$q_l = \frac{B \cdot h_{pl,t}}{V_L} = \frac{41.192 \cdot 28665.9}{3813} = 309.677 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3}$$

stupanj crnoće nesvjetlećeg plamena:

$$\varepsilon_{nsv} = 1 - e^{-k_{nsv} \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0.03447 \cdot 19.275} = 0.2737$$

$$\begin{aligned} k_{nsv} &= \left(\frac{0.78 + 1.6 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{p_n \cdot s}} - 0.1 \right) \cdot \left(1 - 0.37 \cdot \frac{T_{stv}}{1000} \right) \cdot r_n = \\ &= \left(\frac{0.78 + 1.6 \cdot 0.0654}{\sqrt{0.2048 \cdot 9.275}} - 0.1 \right) \cdot \left(1 - 0.37 \cdot \frac{1863.15}{1000} \right) \cdot 0.2048 = 0.03447 \end{aligned}$$

$$r_n = r_{CO_2} + r_{SO_2} + r_{H_2O} = 0.1385 + 0.00081 + 0.0654 = 0.2048$$

$$p_n = p \cdot r_n = 1 \cdot 0.2048 = 0.2048 \text{ bar}$$

$$p \approx 1 \text{ bar}$$

$$\text{pretpostavka: } T_{stv} = t_{stv} + 273.15 = 1590 + 273.15 = 1863.15 \text{ K}$$

2.3.5.3 Stupanj crnoće ložišta

$$\varepsilon_L = \frac{\varepsilon_F}{\varepsilon_F + (1 - \varepsilon_F) \cdot \psi_L \cdot \xi} = \frac{0.5631}{0.5631 + (1 - 0.5631) \cdot 0.97 \cdot 0.45} = 0.747$$

očitano iz tablice. 4.11 (Kreuh: Generatori pare)

za slobodne površine ekranskih cijevi i ugljeni prah kao gorivo: $\xi = 0.45$

2.3.5.4 Efektivna površina ekrana

$$F_{ef} = \frac{q_L \cdot B \cdot 10^8}{C_C \cdot M \cdot \xi \cdot \varepsilon_L \cdot T_{stv} \cdot T_{pl\ t}^3} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{M^2} \cdot \left(\frac{T_{pl\ t}}{T_{stv}} - 1 \right)^2} =$$
$$= \frac{6218.3 \cdot 10^3 \cdot 41.192 \cdot 10^8}{5.67 \cdot 0.3486 \cdot 0.45 \cdot 0.747 \cdot 1863.15 \cdot 2257.64^3} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{0.3486^2} \cdot \left(\frac{2257.64}{1863.15} - 1 \right)^2} = 1289.41 \text{ m}^2$$

$$q_L = \eta_L \cdot (h_{pl\ t} - h_{pl\ stv}) = 0.99 \cdot (28665.9 - 22428.89) = 6218.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

$$\text{za } t_{stv} = 1590 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow h_{pl\ stv} = 22428.89 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

$$T_{stv} = t_{stv} + 273.15 = 1590 + 273.15 = 1863.15 \text{ K}$$

$$\text{odstupanje: } \frac{1289.41 - 1295.83}{1289.41} \cdot 100 = -0.498 \%$$

$$\text{ukupni broj cijevi u ekranima ložišta: } n = \frac{2a + 2b}{s_L} = \frac{2 \cdot 12 + 2 \cdot 12}{0.04} = 1200$$

brzina medija u cijevima ekrana ložišta:

$$w = \frac{D_a \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{338.17 \cdot 0.002108 \cdot 4}{0.02^2 \cdot \pi \cdot 1200} = 1.891 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$v_2, \text{ m}^3/\text{kg}$	0.001382
$v_3, \text{ m}^3/\text{kg}$	0.002835
$v_{sr}, \text{ m}^3/\text{kg}$	0.002108

2.4) PRORAČUN PREGRIJAČA PARE 2

2.4.1 Ogrjevna površina

vanjski promjer cijevi: $d_{pp2} = 0.058 \text{ m}$

debljina stijenke cijevi: $s_{pp2} = 0.006 \text{ m}$

unutarnji promjer cijevi: $d_u = d_{pp2} - 2s_{pp2} = 0.046 \text{ m}$

duljina pregrijača pare: $L_{pp2} = 12 \text{ m}$

broj cijevi u jednom redu: $n_1 = 100$

broj redova cijevi: $n_2 = 8$

poprečni korak cijevi: $t_p = 0.118 \text{ m}$

uzdužni korak cijevi: $t_u = 0.1 \text{ m}$

$$F_{pp2} = n_1 \cdot n_2 \cdot d_{pp2} \cdot \pi \cdot L_{pp2} = 100 \cdot 8 \cdot 0.058 \cdot \pi \cdot 12 = 1749.23 \text{ m}^2$$

2.4.2 Minimalni presjek

$$f = a \cdot b - d_{pp2} \cdot L_{pp2} \cdot n_1 = 12 \cdot 11.918 - 0.058 \cdot 12 \cdot 100 = 73.41 \text{ m}^2$$

$$b = (n_1 + 1) \cdot t_p = (100 + 1) \cdot 0.118 = 11.918 \text{ m}$$

2.4.3 Srednja temperatura dimnih plinova

$$T_{sr} = \frac{T_{ul} + T_{izl}}{2} = \frac{1863.15 + 1488.04}{2} = 1675.59 \text{ K}$$

$$T_{ul} = T_{stv} = 1863.15 \text{ K}$$

temperatura na izlazu iz pp2:

$$\text{za } h_{pl\ izl} = 16876.22 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \rightarrow t_{izl} = 1214.89 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{izl} = 1488.04 \text{ K}$$

$$h_{pl\ izl} = h_{pl\ ul} - q_{pp2} = 22428.8 - 5552.6 = 16876.22 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

2.4.4 Brzina dimnih plinova

$$w = \frac{B \cdot V_{pl} \cdot T_{sr}}{273 \cdot f} = \frac{41.192 \cdot 8.749 \cdot 1675.59}{273 \cdot 73.41} = 30.129 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

2.4.5 Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

paralelni raspored cijevi

$$t_{sr} = T_{sr} - 273.15 = 1079.21 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{odnos poprečnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_1 = \frac{t_p}{d_{pp2}} = \frac{0.118}{0.058} = 2.034$$

$$\text{odnos uzdužnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_2 = \frac{t_u}{d_{pp2}} = \frac{0.1}{0.058} = 1.724$$

$$\text{srednji relativni dijagonalni korak cijevi: } \sigma_{sr} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 2.034^2 + 1.724^2} = 2.001$$

$$\phi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_{sr} - 1} = \frac{2.034 - 1}{2.001 - 1} = 1.0325$$

$$\text{za } 0.1 < \phi_\sigma < 1.7 \rightarrow C_s = 0.34 \cdot \phi_\sigma^{0.1} = 0.34 \cdot 1.0325^{0.1} = 0.341$$

$$\text{za } n_2 < 10 \text{ i } \sigma_1 < 3 \rightarrow C_z = 3.12 \cdot n_2^{0.05} - 2.5 = 3.12 \cdot 8^{0.05} - 2.5 = 0.9618$$

Tabela 4 Svojstva dimnih plinova

T	Ni, m ² /s	Lambda, W/mK	Pr
100	2.08E-05	0.03128	0.7
300	4.39E-05	0.0483	0.65
500	7.30E-05	0.06559	0.62
700	1.07E-04	0.08269	0.6
1000	1.67E-04	0.10897	0.58
1500	2.82E-04	0.15352	0.53
2000	4.19E-04	0.19887	0.49
2200	4.82E-04	0.216	0.47

za $t_{sr} = 1402.44 \text{ } ^\circ\text{C}$:

$$\text{Pr} = 0.5397 \quad \lambda = 0.1448 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \quad \nu = 0.000259 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\begin{aligned} \alpha_k &= C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{d_{pp2}} \cdot \left(\frac{w \cdot d_{pp2}}{\nu} \right)^{0.6} \cdot \text{Pr}^{0.33} = \\ &= 0.9618 \cdot 0.341 \cdot \frac{0.1448}{0.058} \cdot \left(\frac{30.12 \cdot 0.058}{0.000259} \right)^{0.6} \cdot 0.5397^{0.33} = 132.414 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \end{aligned}$$

2.4.6 Koeficijent prijelaza topline zračenjem

temperatura stijenke: $t_s = \frac{t_5 + t_6}{2} + 30 = \frac{450 + 603}{2} + 30 = 556.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ $T_s = 829.65 \text{ K}$

koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova

očitano iz sl. 4.50 (Đurić: Parni kotlovi): $p = 1 \text{ bar}$ $a = 1.08$

debljina sloja plina: $s = \frac{t_u + t_p}{2} - \frac{d_{pp2}}{2} = \frac{0.1 + 0.118}{2} - \frac{0.058}{2} = 0.08 \text{ m}$

stupanj crnoće dimnih plinova: $\varepsilon = 1 - e^{(-a \cdot p \cdot s)} = 1 - e^{(-1.08 \cdot 1 \cdot 0.08)} = 0.0827$

stupanj crnoće stijenke: $\varepsilon_s = 0.8$

koeficijent zračenja crnog tijela: $C_C = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

$$\begin{aligned}\alpha_{zr} &= C_C \cdot \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \cdot \varepsilon \cdot T_{sr}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)} = \\ &= 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0.8 + 1}{2} \cdot 0.0827 \cdot 799.65^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{829.65}{799.65}\right)^4}{1 - \left(\frac{829.65}{799.65}\right)} = 36.99 \frac{W}{m^2 K}\end{aligned}$$

2.4.7 Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

$$\alpha_{pl} = \alpha_k + \alpha_{zr} = 132.41 + 36.99 = 169.408 \frac{W}{m^2 K}$$

2.4.8 Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija

srednja temperatura pare u pregrijaču 2:

$$t_{p\ sr} = \frac{t_5 + t_6}{2} = \frac{450 + 603}{2} = 526.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{p\ sr} = 799.65 \text{ } K$$

srednji specifični volumen u pregrijaču 2:

$$v_{sr} = \frac{v_5 + v_6}{2} = \frac{0.00673 + 0.01149}{2} = 0.00911 \frac{m^3}{kg}$$

$v_5, m^3/kg$	0.006734
$v_6, m^3/kg$	0.011492

srednja brzina pare u cijevima:

$$w_p = \frac{D \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = \frac{364 \cdot 0.00911 \cdot 4}{0.046^2 \cdot \pi \cdot 100} = 19.9604 \frac{m}{s}$$

$$\alpha_w = 0.023 \cdot \frac{\lambda}{d_u} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_u}{\nu} \right)^{0.8} \cdot Pr^{0.4} = 0.023 \cdot \frac{0.0956}{0.046} \cdot \left(\frac{19.96 \cdot 0.046}{2.97 \cdot 10^{-7}} \right)^{0.8} \cdot 1.066^{0.4} = 7646.369 \frac{W}{m^2 K}$$

za $t_{p\ sr} = 526.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ $p_{p\ sr} = 312.5 \text{ } bar$:

Pr	1.06695
$\lambda, W/mK$	0.095683
$\nu, m^2/s$	2.97E-07

2.4.9 Koeficijent prolaza topline

koeficijent toplinske vodljivosti cijevi: $\lambda_{st} = 52 \frac{W}{mK}$

koeficijent zaprljanja: $\xi = 0.9$

$$k = \frac{\xi}{\frac{1}{\alpha_{pl}} + \frac{s_{pp2}}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_w}} = \frac{0.9}{\frac{1}{169.408} + \frac{0.006}{52} + \frac{1}{7646.36}} = 146.364 \frac{W}{m^2 K}$$

2.4.10 Srednja logaritamska temperaturna razlika

ulazna temperatura pare u pregrijač: $t_5 = 450 \text{ } ^\circ\text{C}$

izlazna temperatura pare iz pregrijača: $t_6 = 603 \text{ } ^\circ\text{C}$

ulazna temperatura dimnih plinova u pregrijač: $t_{pl\ ul} = 1590 \text{ } ^\circ\text{C}$

izlazna temperatura dimnih plinova iz pregrijača: $t_{pl\ izl} = 1214.9 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\Delta t_1 = t_{pl\ ul} - t_6 = 1590 - 603 = 987 \text{ } ^\circ\text{C}$$

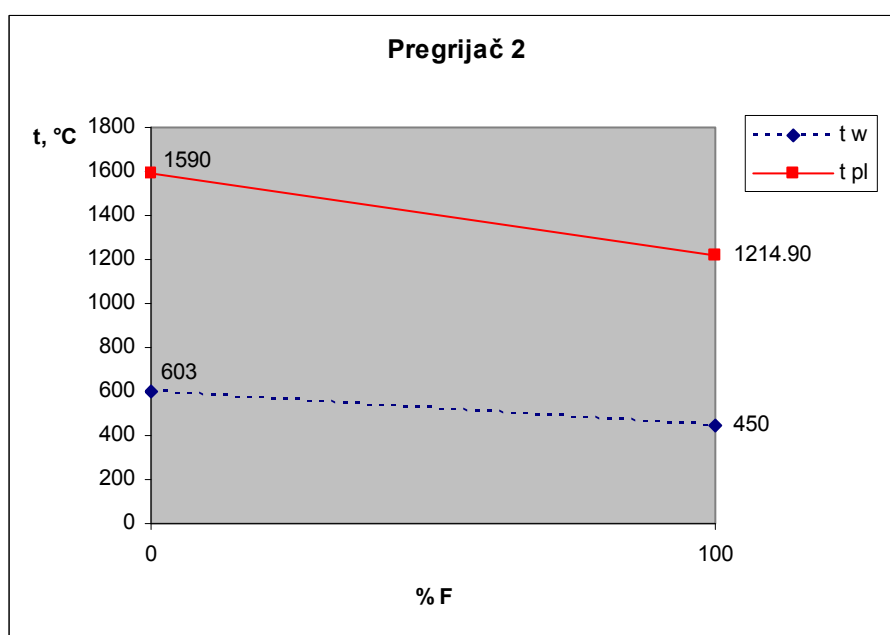
$$\Delta t_2 = t_{pl\ izl} - t_5 = 1214.9 - 450 = 764.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{987 - 764.9}{\ln\left(\frac{987}{764.9}\right)} = 871.23 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2.4.11 Potrebna ogrjevna površina

$$F = \frac{B \cdot q_{pp2}}{\eta_z \cdot k \cdot \Delta t_m} = \frac{41.192 \cdot 5552.66}{0.997 \cdot 146.36 \cdot 871.23} = 1799.06 \text{ } m^2$$

$$\text{odstupanje: } \frac{F_{pp2} - F}{F_{pp2}} \cdot 100 = \frac{1749.23 - 1799.06}{1749.23} \cdot 100 = -2.848 \%$$



Slika 6 Pregrijač pare 2

2.5) PRORAČUN MEĐUPREGRIJAČA PARE 2

2.5.1 Ogrjevna površina

vanjski promjer cijevi: $d_{mp2} = 0.132 \text{ m}$

debljina stijenke cijevi: $s_{mp2} = 0.006 \text{ m}$

unutarnji promjer cijevi: $d_u = d_{mp2} - 2s_{mp2} = 0.12 \text{ m}$

duljina pregrijača pare: $L_{mp2} = 12 \text{ m}$

broj cijevi u jednom redu: $n_1 = 70$

broj redova cijevi: $n_2 = 7$

poprečni korak cijevi: $t_p = 0.168 \text{ m}$

uzdužni korak cijevi: $t_u = 0.16 \text{ m}$

$$F_{mp2} = n_1 \cdot n_2 \cdot d_{mp2} \cdot \pi \cdot L_{mp2} = 2438.37 \text{ m}^2$$

2.5.2 Minimalni presjek

$$f = a \cdot b - d_{mp2} \cdot L_{mp2} \cdot n_1 = 32.25 \text{ m}^2$$

$$b = (n_1 + 1) \cdot t_p = 11.928 \text{ m}$$

2.5.3 Srednja temperatura dimnih plinova

$$T_{sr} = \frac{T_{ul} + T_{izl}}{2} = 1341.91 \text{ K}$$

$$T_{ul} = 1488.04 \text{ K}$$

temperatura na izlazu iz mp2:

$$\text{za } h_{pl\ izl} = 12620.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \rightarrow t_{izl} = 922.62 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{izl} = 1195.77 \text{ K}$$

$$h_{pl\ izl} = h_{pl\ ul} - q_{mp2} = 12620.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

2.5.4 Brzina dimnih plinova

$$w = \frac{B \cdot V_{pl} \cdot T_{sr}}{273 \cdot f} = 54.919 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

2.5.5 Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

paralelni raspored cijevi

$$t_{sr} = T_{sr} - 273.15 = 1068.76 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{odnos poprečnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_1 = \frac{t_p}{d_{mp2}} = 1.272$$

$$\text{odnos uzdužnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_2 = \frac{t_u}{d_{mp2}} = 1.212$$

$$\text{srednji relativni dijagonalni korak cijevi: } \sigma_{sr} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = 1.369$$

$$\phi_{\sigma} = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_{sr} - 1} = 0.739$$

$$\text{za } 0.1 < \phi_{\sigma} < 1.7 \rightarrow C_s = 0.34 \cdot \phi_{\sigma}^{0.1} = 0.349$$

$$\text{za } n_2 < 10 \text{ i } \sigma_1 < 3 \rightarrow C_z = 3.12 \cdot n_2^{0.05} - 2.5 = 0.938$$

T	Ni, m ² /s	Lambda, W/mK	Pr
100	2.08E-05	0.03128	0.7
300	4.39E-05	0.0483	0.65
500	7.30E-05	0.06559	0.62
700	1.07E-04	0.08269	0.6
1000	1.67E-04	0.10897	0.58
1500	2.82E-04	0.15352	0.53
2000	4.19E-04	0.19887	0.49
2200	4.82E-04	0.216	0.47

$$\text{za } t_{sr} = 1068.76 \text{ }^{\circ}\text{C} :$$

$$\text{Pr} = 0.5731$$

$$\lambda = 0.11509 \frac{W}{mK}$$

$$\nu = 0.000182 \frac{m^2}{s}$$

$$\alpha_k = C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{d_{mp2}} \cdot \left(\frac{w \cdot d_{mp2}}{\nu} \right)^{0.6} \cdot \text{Pr}^{0.33} = 129.007 \frac{W}{m^2 K}$$

2.5.6 Koeficijent prijelaza topline zračenjem

temperatura stijenke: $t_s = \frac{t_9 + t_{10}}{2} + 30 = 520.75 \text{ } ^\circ\text{C}$ $T_s = 793.9 \text{ K}$

koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova

očitano iz sl. 4.50 (Đurić: Parni kotlovi): $p = 1 \text{ bar}$ $a = 1.08$

debljina sloja plina: $s = \frac{t_u + t_p}{2} - \frac{d_{mp2}}{2} = 0.098 \text{ m}$

stupanj crnoće dimnih plinova: $\varepsilon = 1 - e^{(-a \cdot p \cdot s)} = 0.1004$

stupanj crnoće stijenke: $\varepsilon_s = 0.8$

koeficijent zračenja crnog tijela: $C_C = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

$$\alpha_{zr} = C_C \cdot \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \cdot \varepsilon \cdot T_{sr}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)} = 26.61 \frac{W}{m^2 K}$$

2.5.7 Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

$$\alpha_{pl} = \alpha_k + \alpha_{zr} = 155.617 \frac{W}{m^2 K}$$

2.5.8 Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija

srednja temperatura pare u međupregrijaču 2:

$$t_{p\ sr} = \frac{t_9 + t_{10}}{2} = 490.75\ ^\circ C \quad T_{p\ sr} = 763.9\ K$$

srednji specifični volumen u međupregrijaču 2:

$$v_{sr} = \frac{v_9 + v_{10}}{2} = 0.0692\ \frac{m^3}{kg}$$

$v_9, m^3/kg$	0.055542
$v_{10}, m^3/kg$	0.083017

srednja brzina pare u cijevima:

$$w_p = \frac{D_1 \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 26.953\ \frac{m}{s}$$

$$\alpha_w = 0.023 \cdot \frac{\lambda}{d_u} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_u}{\nu} \right)^{0.8} \cdot Pr^{0.4} = 1225.079\ \frac{W}{m^2 K}$$

za $t_{p\ sr} = 490.75\ ^\circ C$ $p_{p\ sr} = 48.5\ bar$:

Pr	0.949064
$\lambda, W/mK$	0.069571
$\nu, m^2/s$	1.97E-06

2.5.9 Koeficijent prolaza topline

koeficijent toplinske vodljivosti cijevi: $\lambda_{st} = 52\ \frac{W}{mK}$

koeficijent zaprljanja: $\xi = 0.9$

$$k = \frac{\xi}{\frac{1}{\alpha_{pl}} + \frac{s_{mp2}}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_w}} = 122.321\ \frac{W}{m^2 K}$$

2.5.10 Srednja logaritamska temperaturna razlika

ulazna temperatura pare u međupregrijač: $t_9 = 370 \text{ }^{\circ}\text{C}$

izlazna temperatura pare iz međupregrijača: $t_{10} = 611.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

ulazna temperatura dimnih plinova u međupregrijač: $t_{pl\ ul} = 1214.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$

izlazna temperatura dimnih plinova iz međupregrijača: $t_{pl\ izl} = 922.63 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\Delta t_1 = t_{pl\ ul} - t_{10} = 603.39 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

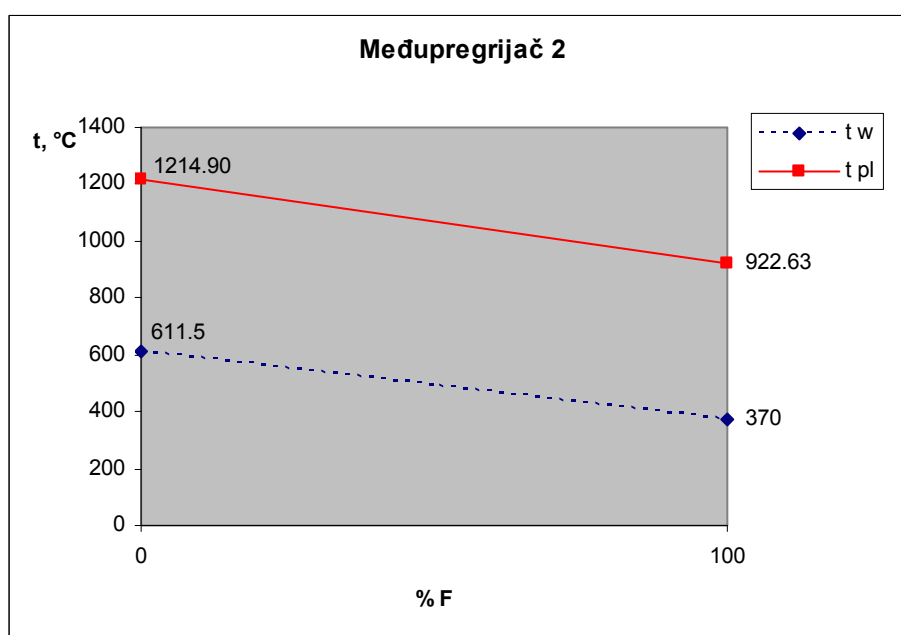
$$\Delta t_2 = t_{pl\ izl} - t_9 = 552.63 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = 577.64 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2.5.11 Potrebna ogrjevna površina

$$F = \frac{B \cdot q_{mp2}}{\eta_z \cdot k \cdot \Delta t_m} = 2488.27 \text{ m}^2$$

$$\text{odstupanje: } \frac{F_{mp2} - F}{F_{mp2}} \cdot 100 = -2.046 \%$$



Slika 7 Međupregrijač pare 2

2.6) PRORAČUN PREGRIJAČA PARE 1

2.6.1 Ogrjevna površina

vanjski promjer cijevi: $d_{pp1} = 0.064 \text{ m}$

debljina stijenke cijevi: $s_{pp1} = 0.006 \text{ m}$

unutarnji promjer cijevi: $d_u = d_{pp1} - 2s_{pp1} = 0.052 \text{ m}$

duljina pregrijača pare: $L_{pp1} = 12 \text{ m}$

broj cijevi u jednom redu: $n_1 = 100$

broj redova cijevi: $n_2 = 54$

poprečni korak cijevi: $t_p = 0.118 \text{ m}$

uzdužni korak cijevi: $t_u = 0.1 \text{ m}$

$$F_{pp1} = n_1 \cdot n_2 \cdot d_{pp1} \cdot \pi \cdot L_{pp1} = 13028.81 \text{ m}^2$$

2.6.2 Minimalni presjek

$$f = a \cdot b - d_{pp1} \cdot L_{pp1} \cdot n_1 = 66.216 \text{ m}^2$$

$$b = (n_1 + 1) \cdot t_p = 11.918 \text{ m}$$

2.6.3 Srednja temperatura dimnih plinova

$$T_{sr} = \frac{T_{ul} + T_{izl}}{2} = 971.49 \text{ K}$$

$$T_{ul} = 1195.77 \text{ K}$$

temperatura na izlazu iz pp1:

$$\text{za } h_{pl\ izl} = 6220.73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \rightarrow t_{izl} = 474.05 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{izl} = 747.2 \text{ K}$$

$$h_{pl\ izl} = h_{pl\ ul} - q_{pp1} = 6220.73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

2.6.4 Brzina dimnih plinova

$$w = \frac{B \cdot V_{pl} \cdot T_{sr}}{273 \cdot f} = 19.368 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

2.6.5 Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

paralelni raspored cijevi

$$t_{sr} = T_{sr} - 273.15 = 698.34 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{odnos poprečnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_1 = \frac{t_p}{d_{pp1}} = 1.843$$

$$\text{odnos uzdužnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_2 = \frac{t_u}{d_{pp1}} = 1.562$$

$$\text{srednji relativni dijagonalni korak cijevi: } \sigma_{sr} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = 1.814$$

$$\phi_{\sigma} = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_{sr} - 1} = 1.036$$

$$\text{za } 0.1 < \phi_{\sigma} < 1.7 \rightarrow C_s = 0.34 \cdot \phi_{\sigma}^{0.1} = 0.341$$

$$\text{za } n_2 > 10 \rightarrow C_z = 1$$

T	Ni, m ² /s	Lambda, W/mK	Pr
100	2.08E-05	0.03128	0.7
300	4.39E-05	0.0483	0.65
500	7.30E-05	0.06559	0.62
700	1.07E-04	0.08269	0.6
1000	1.67E-04	0.10897	0.58
1500	2.82E-04	0.15352	0.53
2000	4.19E-04	0.19887	0.49
2200	4.82E-04	0.216	0.47

$$\text{za } t_{sr} = 698.34 \text{ }^{\circ}\text{C} :$$

$$\text{Pr} = 0.6001$$

$$\lambda = 0.0825 \frac{W}{mK}$$

$$\nu = 0.000107 \frac{m^2}{s}$$

$$\alpha_k = C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{d_{pp1}} \cdot \left(\frac{w \cdot d_{pp1}}{\nu} \right)^{0.6} \cdot \text{Pr}^{0.33} = 102.18 \frac{W}{m^2 K}$$

2.6.6 Koeficijent prijelaza topline zračenjem

temperatura stijenke: $t_s = \frac{t_3 + t_4}{2} + 30 = 465.03 \text{ } ^\circ\text{C}$ $T_s = 738.18 \text{ } K$

koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova

očitano iz sl. 4.50 (Đurić: Parni kotlovi): $p = 1 \text{ } bar$ $a = 1.08$

debljina sloja plina: $s = \frac{t_u + t_p}{2} - \frac{d_{pp1}}{2} = 0.077 \text{ } m$

stupanj crnoće dimnih plinova: $\varepsilon = 1 - e^{(-a \cdot p \cdot s)} = 0.0797$

stupanj crnoće stijenke: $\varepsilon_s = 0.8$

koeficijent zračenja crnog tijela: $C_C = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

$$\alpha_{zr} = C_C \cdot \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \cdot \varepsilon \cdot T_{sr}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)} = 10.364 \frac{W}{m^2 K}$$

2.6.7 Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

$$\alpha_{pl} = \alpha_k + \alpha_{zr} = 112.552 \frac{W}{m^2 K}$$

2.6.8 Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija

srednja temperatura pare u pregrijaču 1:

$$t_{p\ sr} = \frac{t_3 + t_4}{2} = 435.03\ ^\circ C \quad T_{p\ sr} = 708.18\ K$$

srednji specifični volumen u pregrijaču 1:

$$v_{sr} = \frac{v_3 + v_4}{2} = 0.005196\ \frac{m^3}{kg}$$

$v_3, m^3/kg$	0.0028347
$v_4, m^3/kg$	0.0075584

srednja brzina pare u cijevima:

$$w_p = \frac{D_a \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 8.274\ \frac{m}{s}$$

$$\alpha_w = 0.023 \cdot \frac{\lambda}{d_u} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_u}{\nu} \right)^{0.8} \cdot Pr^{0.4} = 7607.494\ \frac{W}{m^2 K}$$

za $t_{p\ sr} = 435.03\ ^\circ C$ $p_{p\ sr} = 325\ bar$:

Pr	1.4343122
$\lambda, W/mK$	0.1078657
$\nu, m^2/s$	1.617E-07

2.6.9 Koeficijent prolaza topline

koeficijent toplinske vodljivosti cijevi: $\lambda_{st} = 52\ \frac{W}{mK}$

koeficijent zaprljanja: $\xi = 0.9$

$$k = \frac{\xi}{\frac{1}{\alpha_{pl}} + \frac{s_{pp1}}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_w}} = 98.559\ \frac{W}{m^2 K}$$

2.6.10 Srednja logaritamska temperaturna razlika

ulazna temperatura pare u pregrijač: $t_3 = 400.07 \text{ } ^\circ\text{C}$

izlazna temperatura pare iz pregrijača: $t_4 = 470 \text{ } ^\circ\text{C}$

ulazna temperatura dimnih plinova u pregrijač: $t_{pl\ ul} = 922.63 \text{ } ^\circ\text{C}$

izlazna temperatura dimnih plinova iz pregrijača: $t_{pl\ izl} = 474.05 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\Delta t_1 = t_{pl\ ul} - t_4 = 452.62 \text{ } ^\circ\text{C}$$

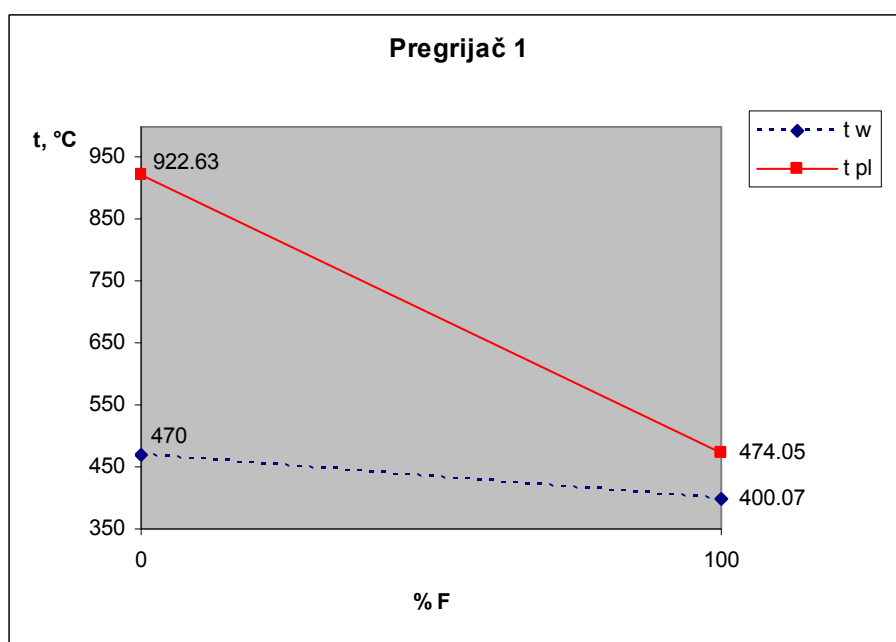
$$\Delta t_2 = t_{pl\ izl} - t_3 = 73.98 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = 209.05 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2.6.11 Potrebna ogrjevna površina

$$F = \frac{B \cdot q_{pp1}}{\eta_z \cdot k \cdot \Delta t_m} = 12833.61 \text{ } m^2$$

$$\text{odstupanje: } \frac{F_{pp1} - F}{F_{pp1}} \cdot 100 = 1.498 \text{ } \%$$



Slika 8 Pregrijač pare 1

2.7) PRORAČUN MEĐUPREGRIJAČA PARE 1

2.7.1 Ogrjevna površina

vanjski promjer cijevi: $d_{mp1} = 0.124 \text{ m}$

debljina stijenke cijevi: $s_{mp1} = 0.006 \text{ m}$

unutarnji promjer cijevi: $d_u = d_{mp1} - 2s_{mp1} = 0.112 \text{ m}$

duljina pregrijača pare: $L_{mp1} = 12 \text{ m}$

broj cijevi u jednom redu: $n_1 = 70$

broj redova cijevi: $n_2 = 34$

poprečni korak cijevi: $t_p = 0.168 \text{ m}$

uzdužni korak cijevi: $t_u = 0.16 \text{ m}$

$$F_{mp1} = n_1 \cdot n_2 \cdot d_{mp1} \cdot \pi \cdot L_{mp1} = 11125.76 \text{ m}^2$$

2.7.2 Minimalni presjek

$$f = a \cdot b - d_{mp1} \cdot L_{mp1} \cdot n_1 = 38.976 \text{ m}^2$$

$$b = (n_1 + 1) \cdot t_p = 11.928 \text{ m}$$

2.7.3 Srednja temperatura dimnih plinova

$$T_{sr} = \frac{T_{ul} + T_{izl}}{2} = 695.35 \text{ K}$$

$$T_{ul} = 747.2 \text{ K}$$

temperatura na izlazu iz mp1:

$$\text{za } h_{pl\ izl} = 4859.99 \frac{kJ}{kg_B} \rightarrow t_{izl} = 370.36 \text{ } ^\circ C \quad T_{izl} = 643.51 \text{ K}$$

$$h_{pl\ izl} = h_{pl\ ul} - q_{mp1} = 4859.99 \frac{kJ}{kg_B}$$

2.7.4 Brzina dimnih plinova

$$w = \frac{B \cdot V_{pl} \cdot T_{sr}}{273 \cdot f} = 23.551 \frac{m}{s}$$

2.7.5 Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

paralelni raspored cijevi

$$t_{sr} = T_{sr} - 273.15 = 422.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{odnos poprečnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_1 = \frac{t_p}{d_{mp1}} = 1.354$$

$$\text{odnos uzdužnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_2 = \frac{t_u}{d_{mp1}} = 1.2903$$

$$\text{srednji relativni dijagonalni korak cijevi: } \sigma_{sr} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = 1.457$$

$$\phi_{\sigma} = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_{sr} - 1} = 0.7758$$

$$\text{za } 0.1 < \phi_{\sigma} < 1.7 \rightarrow C_s = 0.34 \cdot \phi_{\sigma}^{0.1} = 0.3314$$

$$\text{za } n_2 > 10 \rightarrow C_z = 1$$

T	Ni, m ² /s	Lambda, W/mK	Pr
100	2.08E-05	0.03128	0.7
300	4.39E-05	0.0483	0.65
500	7.30E-05	0.06559	0.62
700	1.07E-04	0.08269	0.6
1000	1.67E-04	0.10897	0.58
1500	2.82E-04	0.15352	0.53
2000	4.19E-04	0.19887	0.49
2200	4.82E-04	0.216	0.47

$$\text{za } t_{sr} = 422.2 \text{ }^{\circ}\text{C} :$$

$$\text{Pr} = 0.6316$$

$$\lambda = 0.05886 \frac{W}{mK}$$

$$\nu = 6.168 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$\alpha_k = C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{d_{pp}} \cdot \left(\frac{w \cdot d_{pp}}{\nu} \right)^{0.6} \cdot \text{Pr}^{0.33} = 86.343 \frac{W}{m^2 K}$$

2.7.6 Koeficijent prijelaza topline zračenjem

temperatura stijenke: $t_s = \frac{t_7 + t_8}{2} + 30 = 385.35 \text{ } ^\circ\text{C}$ $T_s = 658.5 \text{ } K$

koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova

očitano iz sl. 4.50 (Đurić: Parni kotlovi): $p = 1 \text{ } bar$ $a = 1.08$

debljina sloja plina: $s = \frac{t_u + t_p}{2} - \frac{d_{mp1}}{2} = 0.102 \text{ } m$

stupanj crnoće dimnih plinova: $\varepsilon = 1 - e^{(-a \cdot p \cdot s)} = 0.1043$

stupanj crnoće stijenke: $\varepsilon_s = 0.8$

koeficijent zračenja crnog tijela: $C_C = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

$$\alpha_{zr} = C_C \cdot \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \cdot \varepsilon \cdot T_{sr}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)} = 6.609 \frac{W}{m^2 K}$$

2.7.7 Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

$$\alpha_{pl} = \alpha_k + \alpha_{zr} = 92.952 \frac{W}{m^2 K}$$

2.7.8 Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija

srednja temperatura pare u međupregrijaču 1:

$$t_{p\ sr} = \frac{t_7 + t_8}{2} = 355.35\ ^\circ C \quad T_{p\ sr} = 628.5\ K$$

srednji specifični volumen u međupregrijaču 1:

$$v_{sr} = \frac{v_7 + v_8}{2} = 0.053\ \frac{m^3}{kg}$$

$v_7, m^3/kg$	0.048159
$v_8, m^3/kg$	0.057863

srednja brzina pare u cijevima:

$$w_p = \frac{D_{1a} \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 23.039\ \frac{m}{s}$$

$$\alpha_w = 0.023 \cdot \frac{\lambda}{d_u} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_u}{\nu} \right)^{0.8} \cdot Pr^{0.4} = 1380.84\ \frac{W}{m^2 K}$$

za $t_{p\ sr} = 355.35\ ^\circ C$ $p_{p\ sr} = 49.5\ bar$:

Pr	1.048733
$\lambda, W/mK$	0.056316
$\nu, m^2/s$	1.19E-06

2.7.9 Koeficijent prolaza topline

koeficijent toplinske vodljivosti cijevi: $\lambda_{st} = 52\ \frac{W}{mK}$

koeficijent zaprljanja: $\xi = 0.9$

$$k = \frac{\xi}{\frac{1}{\alpha_{pl}} + \frac{s_{mp1}}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_w}} = 77.601\ \frac{W}{m^2 K}$$

2.7.10 Srednja logaritamska temperaturna razlika

ulazna temperatura pare u međupregrijač: $t_7 = 320.7 \text{ } ^\circ\text{C}$

izlazna temperatura pare iz međupregrijača: $t_8 = 390 \text{ } ^\circ\text{C}$

ulazna temperatura dimnih plinova u međupregrijač: $t_{pl\ ul} = 474.05 \text{ } ^\circ\text{C}$

izlazna temperatura dimnih plinova iz međupregrijača: $t_{pl\ izl} = 370.36 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\Delta t_1 = t_{pl\ ul} - t_8 = 84.05 \text{ } ^\circ\text{C}$$

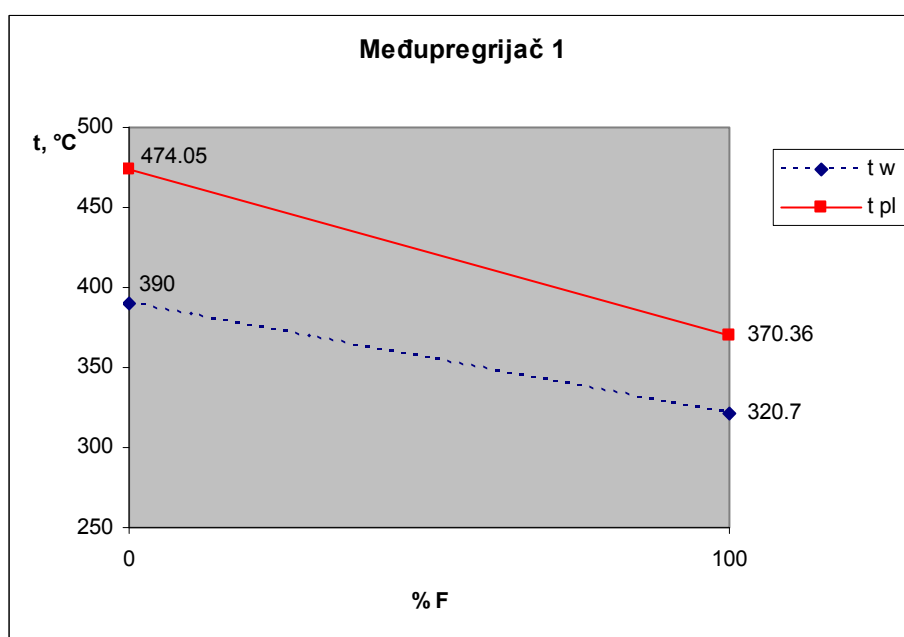
$$\Delta t_2 = t_{pl\ izl} - t_7 = 49.66 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = 65.35 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2.7.11 Potrebna ogrjevna površina

$$F = \frac{B \cdot q_{mp1}}{\eta_z \cdot k \cdot \Delta t_m} = 11084.81 \text{ } m^2$$

$$\text{odstupanje: } \frac{F_{mp2} - F}{F_{mp2}} \cdot 100 = 0.368 \%$$



Slika 9 Međupregrijač pare 1

2.8) PRORAČUN ZAGRIJAČA VODE

2.8.1 Ogrjevna površina

vanjski promjer cijevi: $d_{zv} = 0.064 \text{ m}$

debljina stijenke cijevi: $s_{zv} = 0.006 \text{ m}$

unutarnji promjer cijevi: $d_u = d_{zv} - 2s_{zv} = 0.062 - 2 \cdot 0.006 = 0.052 \text{ m}$

duljina pregrijača pare: $L_{zv} = 12 \text{ m}$

broj cijevi u jednom redu: $n_1 = 100$

broj redova cijevi: $n_2 = 54$

poprečni korak cijevi: $t_p = 0.118 \text{ m}$

uzdužni korak cijevi: $t_u = 0.1 \text{ m}$

$$F_{zv} = n_1 \cdot n_2 \cdot d_{zv} \cdot \pi \cdot L_{zv} = 13028.81 \text{ m}^2$$

2.8.2 Minimalni presjek

$$f = a \cdot b - d_{pp1} \cdot L_{zv} \cdot n_1 = 66.216 \text{ m}^2$$

$$b = (n_1 + 1) \cdot t_p = 11.918 \text{ m}$$

2.8.3 Srednja temperatura dimnih plinova

$$T_{sr} = \frac{T_{ul} + T_{izl}}{2} = 615.02 \text{ K}$$

$$T_{ul} = 643.51 \text{ K}$$

temperatura na izlazu iz zv:

$$\text{za } h_{pl\ izl} = 4135.14 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \rightarrow t_{izl} = 313.37 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{izl} = 586.52 \text{ K}$$

$$h_{pl\ izl} = h_{pl\ ul} - q_{zv} = 4135.14 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

2.8.4 Brzina dimnih plinova

$$w = \frac{B \cdot V_{pl} \cdot T_{sr}}{273 \cdot f} = 12.261 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

2.8.5 Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

paralelni raspored cijevi

$$t_{sr} = T_{sr} - 273.15 = 341.87 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{odnos poprečnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_1 = \frac{t_p}{d_{zv}} = 1.843$$

$$\text{odnos uzdužnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_2 = \frac{t_u}{d_{zv}} = 1.562$$

$$\text{srednji relativni dijagonalni korak cijevi: } \sigma_{sr} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = 1.814$$

$$\phi_{\sigma} = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_{sr} - 1} = 1.036$$

$$\text{za } 0.1 < \phi_{\sigma} < 1.7 \rightarrow C_s = 0.34 \cdot \phi_{\sigma}^{0.1} = 0.3412$$

$$\text{za } n_2 > 10 \rightarrow C_z = 1$$

T	Ni, m ² /s	Lambda, W/mK	Pr
100	2.08E-05	0.03128	0.7
300	4.39E-05	0.0483	0.65
500	7.30E-05	0.06559	0.62
700	1.07E-04	0.08269	0.6
1000	1.67E-04	0.10897	0.58
1500	2.82E-04	0.15352	0.53
2000	4.19E-04	0.19887	0.49
2200	4.82E-04	0.216	0.47

$$\text{za } t_{sr} = 341.87 \text{ }^{\circ}\text{C} :$$

$$\text{Pr} = 0.6437$$

$$\lambda = 0.0519 \frac{W}{mK}$$

$$\nu = 5 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$\alpha_k = C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{d_{zv}} \cdot \left(\frac{w \cdot d_{zv}}{\nu} \right)^{0.6} \cdot \text{Pr}^{0.33} = 78.802 \frac{W}{m^2 K}$$

2.8.6 Koeficijent prijelaza topline zračenjem

temperatura stijenke: $t_s = \frac{t_1 + t_2}{2} + 30 = 336.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ $T_s = 609.65 \text{ } K$

koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova

očitano iz sl. 4.50 (Đurić: Parni kotlovi): $p = 1 \text{ } bar$ $a = 1.08$

debljina sloja plina: $s = \frac{t_u + t_p}{2} - \frac{d_{zv}}{2} = 0.077 \text{ } m$

stupanj crnoće dimnih plinova: $\varepsilon = 1 - e^{(-a \cdot p \cdot s)} = 0.0797$

stupanj crnoće stijenke: $\varepsilon_s = 0.8$

koeficijent zračenja crnog tijela: $C_C = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

$$\alpha_{zr} = C_C \cdot \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \cdot \varepsilon \cdot T_{sr}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)} = 3.739 \frac{W}{m^2 K}$$

2.8.7 Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

$$\alpha_{pl} = \alpha_k + \alpha_{zr} = 82.542 \frac{W}{m^2 K}$$

2.8.8 Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija

$$\alpha_w 15000 \frac{W}{m^2 K}$$

2.8.9 Koeficijent prolaza topline

koeficijent toplinske vodljivosti cijevi: $\lambda_{st} = 52 \frac{W}{mK}$

koeficijent zaprljanja: $\xi = 0.9$

$$k = \frac{\xi}{\frac{1}{\alpha_{pl}} + \frac{s_{zv}}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_w}} = 73.188 \frac{W}{m^2 K}$$

2.8.10 Srednja logaritamska temperaturna razlika

ulazna temperatura pare u zagrijač vode: $t_1 = 298 \text{ } ^\circ C$

izlazna temperatura pare iz zagrijača vode: $t_2 = 315 \text{ } ^\circ C$

ulazna temperatura dimnih plinova u zagrijač vode: $t_{pl\ ul} = 370.36 \text{ } ^\circ C$

izlazna temperatura dimnih plinova iz zagrijača vode: $t_{pl\ izl} = 313.38 \text{ } ^\circ C$

$$\Delta t_1 = t_{pl\ ul} - t_2 = 55.36 \text{ } ^\circ C$$

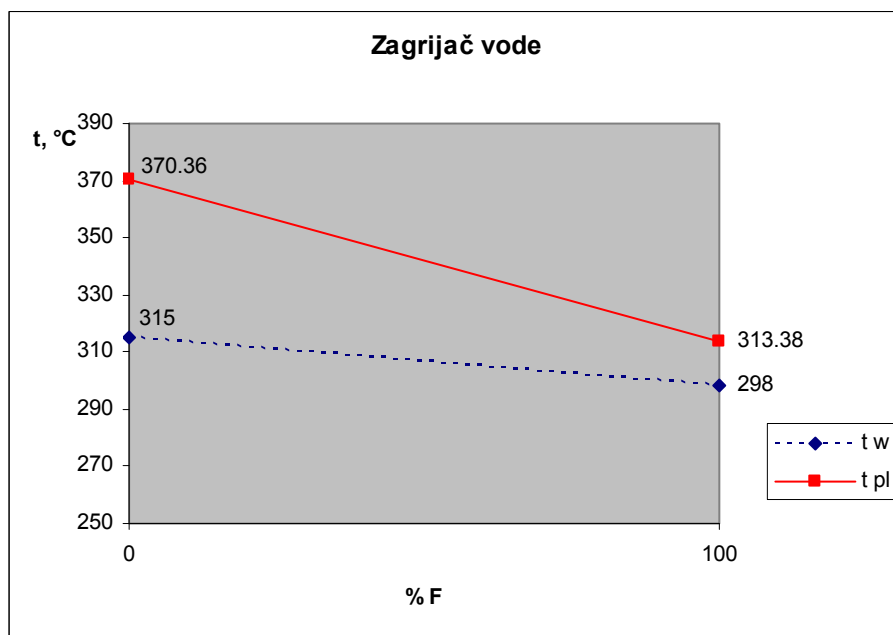
$$\Delta t_2 = t_{pl\ izl} - t_1 = 15.38 \text{ } ^\circ C$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = 31.21 \text{ } ^\circ C$$

2.8.11 Potrebna ogrjevna površina

$$F = \frac{B \cdot q_{zv}}{\eta_z \cdot k \cdot \Delta t_m} = 13108.09 \text{ m}^2$$

odstupanje: $\frac{F_{zv} - F}{F_{zv}} \cdot 100 = -0.608 \%$



Slika 10 Zagrijač vode

2.9) PRORAČUN ZAGRIJAČA ZRAKA

Ljungstromov regenerativni zagrijač

2.9.1 Ogrjevnost površina

debljina lima: $\delta = 0.6 \text{ mm}$

broj segmenata: $m_s = 12$

broj limova u jednom segmentu: $z = 100$

širina limova: $b = 5 \text{ m}$

dužina limova: $l = 4.4 \text{ m}$

poprečni presjek otvora: $F_o = \frac{(d^2 - d_1^2) \cdot \pi}{4} = \frac{(17^2 - 1^2) \cdot \pi}{4} = 94.247 \text{ m}^2$

površina limova na poprečnom presjeku: $F_l = \delta \cdot m_s \cdot z = 3.6 \text{ m}^2$

slobodni presjek za dimne plinove: $F_{pl} = 0.6 \cdot (F_o - F_l) = 54.38 \text{ m}^2$

slobodni presjek za zrak: $F_z = 0.4 \cdot (F_o - F_l) = 36.25 \text{ m}^2$

$$F_{zz} = b \cdot l \cdot m_s \cdot z = 26400 \text{ m}^2$$

2.9.2 Temperature radnih medija i toplina koju je potrebno izmjeniti

ulazna temperatura zraka u zagrijač: $t_{zr1} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

izlazna temperatura zraka iz zagrijača: $t_{zr2} = 240 \text{ }^\circ\text{C}$

ulazna temperatura dimnih plinova u zagrijač: $t_{plul} = 313.38 \text{ }^\circ\text{C}$

izlazna temperatura dimnih plinova iz zagrijača: $t_{plizl} = 131.01 \text{ }^\circ\text{C}$

toplina koju je potrebno izmjeniti:

$q_{zz}, \text{ kJ/kg}_B$	2419.44
---------------------------	---------

2.9.3 Srednja logaritamska temperaturna razlika

$$\Delta t_1 = t_{plul} - t_{zr3} = 73.38 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_{plizl} - t_{zr2} = 111.01 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = 90.9 \text{ }^\circ\text{C}$$

2.9.4 Srednje temperature zraka i dimnih plinova

$$t_{pl\ sr} = \frac{t_{pl\ ul} + t_{pl\ izl}}{2} = 222.19\ ^\circ C \quad T_{pl\ sr} = 495.34\ K$$

$$t_{zr\ sr} = \frac{t_{zr\ 2} + t_{zr\ 3}}{2} = 130\ ^\circ C \quad T_{zr\ sr} = 403.15\ K$$

2.9.5 Temperature lima

$$t_{L\ pl} = t_{pl\ sr} - 3 = 219.19\ ^\circ C$$

$$t_{L\ zr} = t_{zr\ sr} - 3 = 127\ ^\circ C$$

2.9.6 Srednje brzine dimnih plinova i zraka

$$w = \frac{B \cdot V_{pl} \cdot T_{sr}}{273 \cdot F_{pl}} = 12.023\ \frac{m}{s}$$

$$w_{zr} = \frac{B \cdot V_{zr} \cdot T_{sr}}{273 \cdot F_z} = 14.004\ \frac{m}{s}$$

2.9.7 Koeficijent prolaza topline

očitano iz sl. 4.106 (Đurić: Parni kotlovi):

$$\alpha_1' = 76 \frac{W}{m^2 K}, \quad \alpha_2' = 66 \frac{W}{m^2 K}$$

$$C_H = 1.15, \quad C_\Phi = 1.15, \quad C_\Phi' = 1.1, \quad C_l = 1$$

korekcija uz očitane koeficijente:

$$\text{na strani dimnih plinova: } \alpha_1 = C_H \cdot C_\Phi \cdot C_l \cdot \alpha_1' = 100.51 \frac{W}{m^2 K}$$

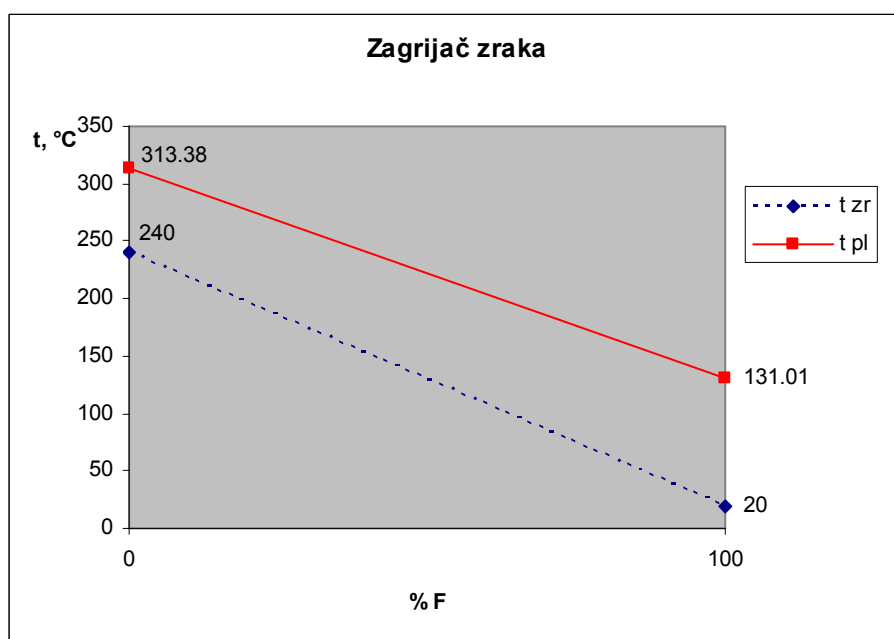
$$\text{na strani zraka: } \alpha_2 = C_H \cdot C_\Phi' \cdot C_l \cdot \alpha_2' = 83.49 \frac{W}{m^2 K}$$

$$k = \frac{\xi}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 41.04 \frac{W}{m^2 K}$$

2.9.8 Potrebna ogrjevna površina

$$F = \frac{B \cdot q_{zz}}{k \cdot \Delta t_m} = 26710.49 \text{ m}^2$$

odstupanje: $\frac{F_{zz2} - F}{F_{zz2}} \cdot 100 = -1.176 \%$



Slika 11 Zagrijač zraka

3. HIDRODINAMIČKI PRORAČUN

3.1) PRORAČUN ZAGRIJAČA VODE

3.1.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi

$$\Delta p_{tr} = \lambda \cdot \frac{L}{d_u} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 3.957 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

ukupna duljina jedne cijevi: $L = 648 \text{ m}$

koeficijent trenja:

očitano iz tablice 5.4 (Kreuh: Generatori pare) $\lambda = 0.0185$

srednja brzina:

$$w_{sr} = \frac{D_a \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 2.156 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{gustoća: } \rho_{sr} = \frac{1}{v_{sr}} = 738.55 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

3.1.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)

$$\Delta p_l = \Sigma \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0.3639 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\Sigma \zeta = i \cdot \zeta = 21.2$$

koeficijent otpora strujanja zbog zakrivljenosti cijevi:

očitano iz tablice 5.3 (Kreuh: Generatori pare) $\zeta = 0.4$

3.1.3 Ukupni pad tlaka

$$\Delta p_{zv} = \Delta p_{tr} + \Delta p_l = 4.321 \text{ bar}$$

3.2) PRORAČUN EKRANA LOŽIŠTA

3.2.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi

$$\Delta p_{tr} = \lambda \cdot \frac{L}{d_u} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0.2275 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

ukupna duljina jedne cijevi: $L = 29 \text{ m}$

koeficijent trenja:

očitano iz tablice 5.4 (Kreuh: Generatori pare) $\lambda = 0.0185$

srednja brzina:

$$w_{sr} = \frac{D_a \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 1.8912 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{gustoća: } \rho_{sr} = \frac{1}{v_{sr}} = 474.29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

3.2.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)

$$\Delta p_l = \Sigma \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0$$

$$\Sigma \zeta = i \cdot \zeta = 0$$

koeficijent otpora strujanja zbog zakrivljenosti cijevi:

očitano iz tablice 5.3 (Kreuh: Generatori pare) $\zeta = 0.4$

3.2.3 Ukupni pad tlaka

$$\Delta p_L = \Delta p_{tr} + \Delta p_l = 0.2275 \text{ bar}$$

3.3) PRORAČUN PREGRIJAČA PARE 1

3.3.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi

$$\Delta p_{tr} = \lambda \cdot \frac{L}{d_u} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 15.188 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

ukupna duljina jedne cijevi: $L = 648 \text{ m}$

koeficijent trenja:

očitano iz tablice 5.4 (Kreuh: Generatori pare) $\lambda = 0.0185$

srednja brzina:

$$w_{sr} = \frac{D_a \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 8.274 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{gustoća: } \rho_{sr} = \frac{1}{v_{sr}} = 192.43 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

3.3.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)

$$\Delta p_l = \Sigma \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 1.396 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\Sigma \zeta = i \cdot \zeta = 21.2$$

koeficijent otpora strujanja zbog zakrivljenosti cijevi:

očitano iz tablice 5.3 (Kreuh: Generatori pare) $\zeta = 0.4$

3.3.3 Ukupni pad tlaka

$$\Delta p_{pr1} = \Delta p_{tr} + \Delta p_l = 16.585 \text{ bar}$$

3.4) PRORAČUN PREGRIJAČA PARE 2

3.4.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi

$$\Delta p_{tr} = \lambda \cdot \frac{L}{d_u} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 8.439 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

ukupna duljina jedne cijevi: $L = 96 \text{ m}$

koeficijent trenja:

očitano iz tablice 5.4 (Kreuh: Generatori pare) $\lambda = 0.0185$

srednja brzina:

$$w_{sr} = \frac{D \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 19.9604 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{gustoća: } \rho_{sr} = \frac{1}{v_{sr}} = 109.72 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

3.4.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)

$$\Delta p_l = \Sigma \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0.612 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\Sigma \zeta = i \cdot \zeta = 2.8$$

koeficijent otpora strujanja zbog zakrivljenosti cijevi:

očitano iz tablice 5.3 (Kreuh: Generatori pare) $\zeta = 0.4$

3.4.3 Ukupni pad tlaka

$$\Delta p_{pr2} = \Delta p_{tr} + \Delta p_l = 9.051 \text{ bar}$$

3.5) PRORAČUN MEĐUPREGRIJAČA PARE 1

3.5.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi

$$\Delta p_{tr} = \lambda \cdot \frac{L}{d_u} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 2.553 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

ukupna duljina jedne cijevi: $L = 408 \text{ m}$

koeficijent trenja:

očitano iz tablice 5.4 (Kreuh: Generatori pare) $\lambda = 0.014$

srednja brzina:

$$w_{sr} = \frac{D_{1a} \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 23.039 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{gustoća: } \rho_{sr} = \frac{1}{v_{sr}} = 18.864 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

3.5.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)

$$\Delta p_l = \Sigma \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0.6608 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\Sigma \zeta = i \cdot \zeta = 13.2$$

koeficijent otpora strujanja zbog zakrivljenosti cijevi:

očitano iz tablice 5.3 (Kreuh: Generatori pare) $\zeta = 0.4$

3.5.3 Ukupni pad tlaka

$$\Delta p_{mp1} = \Delta p_{tr} + \Delta p_l = 3.214 \text{ bar}$$

3.6) PRORAČUN MEĐUPREGRIJAČA PARE 2

3.6.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi

$$\Delta p_{tr} = \lambda \cdot \frac{L}{d_u} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0.513 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

ukupna duljina jedne cijevi: $L = 84 \text{ m}$

koeficijent trenja:

očitano iz tablice 5.4 (Kreuh: Generatori pare) $\lambda = 0.014$

srednja brzina:

$$w_{sr} = \frac{D_1 \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 26.953 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{gustoća: } \rho_{sr} = \frac{1}{v_{sr}} = 14.434 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

3.6.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)

$$\Delta p_l = \Sigma \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0.125 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\Sigma \zeta = i \cdot \zeta = 2.4$$

koeficijent otpora strujanja zbog zakrivljenosti cijevi:

očitano iz tablice 5.3 (Kreuh: Generatori pare) $\zeta = 0.4$

3.6.3 Ukupni pad tlaka

$$\Delta p_{mp2} = \Delta p_{tr} + \Delta p_l = 0.639 \text{ bar}$$

4. PRORAČUN ČVRSTOĆE

materijal cijevi izmjenjivača topline: čelik 13CrMo45 $\sigma_{dop} = 300 \frac{N}{mm^2}$

naprezanje u poprečnom presjeku za:

1.) zagrijač vode

$$\sigma_{p_{zv}} = \frac{p_{sr} \cdot d_u}{2 \cdot s_{zv}} = 145.6 \frac{N}{mm^2} < \sigma_{dop} = 300 \frac{N}{mm^2}$$

2.) cijevi ekrana ložišta:

$$\sigma_{p_L} = \frac{p_{sr} \cdot d_u}{2 \cdot s_L} = 66.7 \frac{N}{mm^2} < \sigma_{dop} = 300 \frac{N}{mm^2}$$

3.) pregrijač pare 1

$$\sigma_{p_{pp1}} = \frac{p_{sr} \cdot d_u}{2 \cdot s_{pp1}} = 140.83 \frac{N}{mm^2} < \sigma_{dop} = 300 \frac{N}{mm^2}$$

4.) pregrijač pare 2

$$\sigma_{p_{pp2}} = \frac{p_{sr} \cdot d_u}{2 \cdot s_{pp2}} = 119.79 \frac{N}{mm^2} < \sigma_{dop} = 300 \frac{N}{mm^2}$$

5.) međupregrijač pare 1

$$\sigma_{p_{mp1}} = \frac{p_{sr} \cdot d_u}{2 \cdot s_{mp1}} = 46.2 \frac{N}{mm^2} < \sigma_{dop} = 300 \frac{N}{mm^2}$$

6.) međupregrijač pare 2

$$\sigma_{p_{mp2}} = \frac{p_{sr} \cdot d_u}{2 \cdot s_{mp2}} = 48.5 \frac{N}{mm^2} < \sigma_{dop} = 300 \frac{N}{mm^2}$$

5. OBRADA DIMNIH PLINOVA

Emisije CO₂, SO_x, NO_x i prašine smanjuju se postizanjem većeg stupnja djelovanja postrojenja, ali također se koristi i niz postupaka za pročišćavanje dimnih plinova.

5.1) SUSTAV ZA SMANJENJE EMISIJE DUŠIKOVIH OKSIDA (De-NO_x)

Tokom procesa izgaranja ugljena stvaraju se dušični oksidi (NO_x). Nakon izgaranja u kotlu koncentracija NO_x iznosi približno 400 mg/Nm³. Procesom selektivne katalitičke redukcije (SCR) koncentracija NO_x se snižava na manje od 80 mg/Nm³.

Selektivnom katalitičkom redukcijom dušični oksidi pretvaraju se u dušik i vodu pri kontaktu sa amonijakom kao redukcijskim sredstvom u prisutnosti odgovarajućeg katalizatora.

Redukcijsko sredstvo ubacuje se u dimne plinove prije katalizatora u količinama temeljenim na traženim vrijednostima redukcije.

Dijelovi SCR sustava:

- 1) katalitički reaktor
- 2) sustav za skladištenje i rukovanje ureom
- 3) sustav za proizvodnju plinovitog amonijaka
- 4) sustav miješanja isparenog amonijaka sa zrakom

5.2) SUSTAV ZA SMANJENJE EMISIJE PRAŠINE

U dimnim plinovima koji su produkt izgaranja ugljena nalaze se čestice prašine koje se moraju ukloniti prije ispuštanja dimnih plinova u okoliš.

Emisiju prašine potrebno je smanjiti ispod dozvoljene količine koja iznosi 10 mg/m³.

Filteri koji se koriste za uklanjanje prašine su elektrostatski filteri (ESP). To su uređaji u kojima se za izdvajanje prašine koriste električne sile i sila gravitacije. Veće čestice se izdvajaju gravitacijskom silom, a manje električnim silama.

Dimni plin struji duž više paralelnih prolaza (taložnih elektroda) između kojih su smještene emisijske elektrode.

Emisijske elektrode su spojene na negativni pol visokonaponskog reguliranog ispravljača, a taložne elektrode su uzemljene. Visoki napon između emisijskih i taložnih elektroda uzrokuje ionizaciju plinova, tako proizvedeni negativni ioni sudaraju se s česticama prašine.

Čestice prašine koje su sada nabijene kreću se pod utjecajem električnog polja prema taložnim elektrodama gdje se talože.

Nataložena prašina se preko sustava otresača kontinuirano otresa i pada u bunkere prašine.

Fizikalne veličine koje utječu na ESP:

- 1) specifični otpor prašine
 - najbolji učinci postižu se sa specifičnim otporom 10^4 do 10^{10} Ω/cm
- 2) temperatura dimnih plinova
 - viša temperatura je povoljnija
- 3) sadržaj vlage u dimnim plinovima
 - viši sadržaj vlage poboljšava rad ESP
- 4) sadržaj SO_3 u plinovima
 - uz istovremeno prisustvo vlage poboljšava rad ESP

5.3) SUSTAV ODSUMPORAVANJA DIMNIH PLINOVA

Emisija SO_2 smanjuje se mokrim postupkom odsumporavanja dodatkom vapna, gdje se neutralizacija kiselih sumpornih spojeva vrši dodavanjem $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a kao konačni produkt nastaje gips.

Za dani pretičak zraka ($\lambda = 1.25 - 1.37$) koristi se kiseli postupak odsumporavanja kod kojeg su pH vrijedosti 3.7 - 5.4.

Prednosti kiselog postupka (u odnosu na neutralni):

- stupanj odstranjivanja sumpora je veći od 95%
- dobiveni gips ima manje onečišćenja
- manja potrošnja vapna

Kod postupka odsumporavanja vrši se i obrada otpadnih voda iz postrojenja za odsumporavanje (fizikalno-kemijska obrada koja se sastoji iz neutralizacije, taloženja i filtracije).

6. ZAKLJUČAK

Za traženu proizvodnju pare $D = 364 \text{ kg/s}$, te ostale zadane parametre, koristi se toranjski tip nadkritičnog generatora pare sljedećih karakteristika:

stupanj djelovanja : $\eta_K = 0.928$

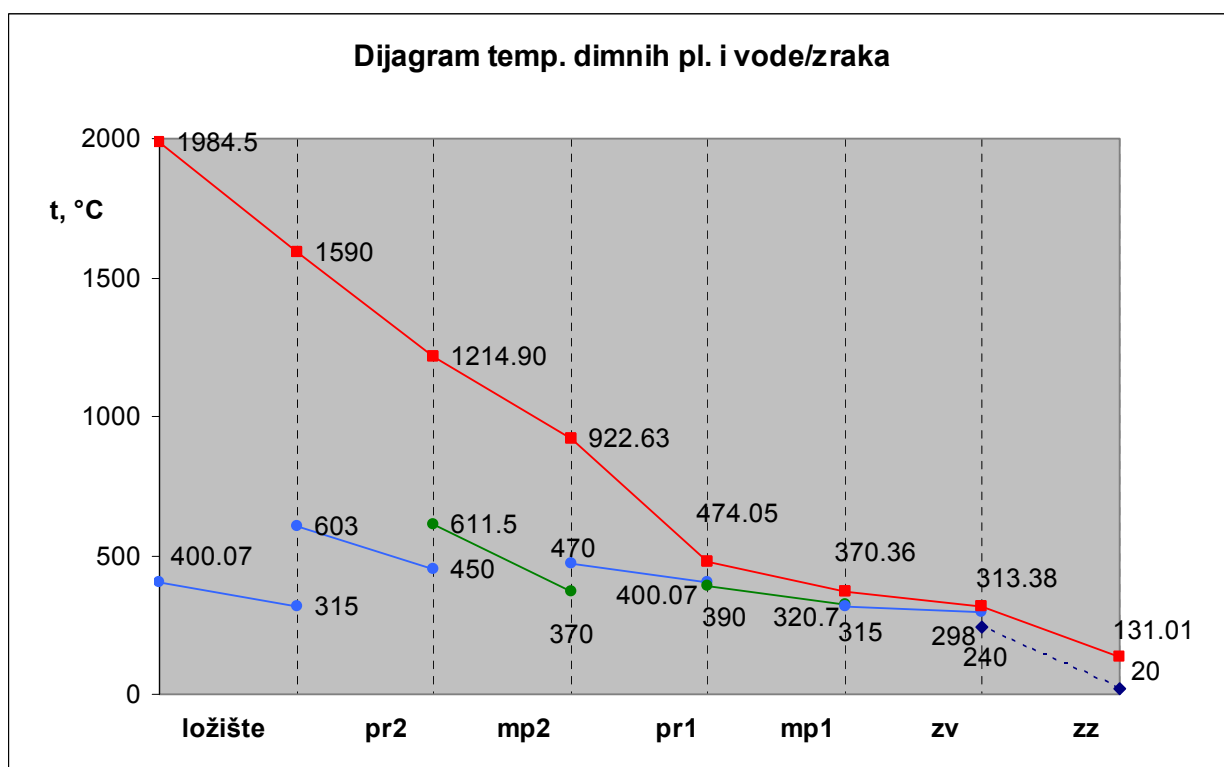
količina goriva : $B = 41.192 \frac{\text{kg}_B}{\text{s}}$

izlazna temperatura dimnih plinova : $t_{izl} \approx 130 \text{ } ^\circ\text{C}$

dimenzije ložišta : $12 \text{ m} \times 12 \text{ m} \times 23.5 \text{ m}$

izmjenjivačke površine : zagrijač vode
2 pregrijača
2 međupregrijača
zagrijač zraka

plamenici : 4 nivoa, u svakom su 4 tangencijalno razmještena plamenika



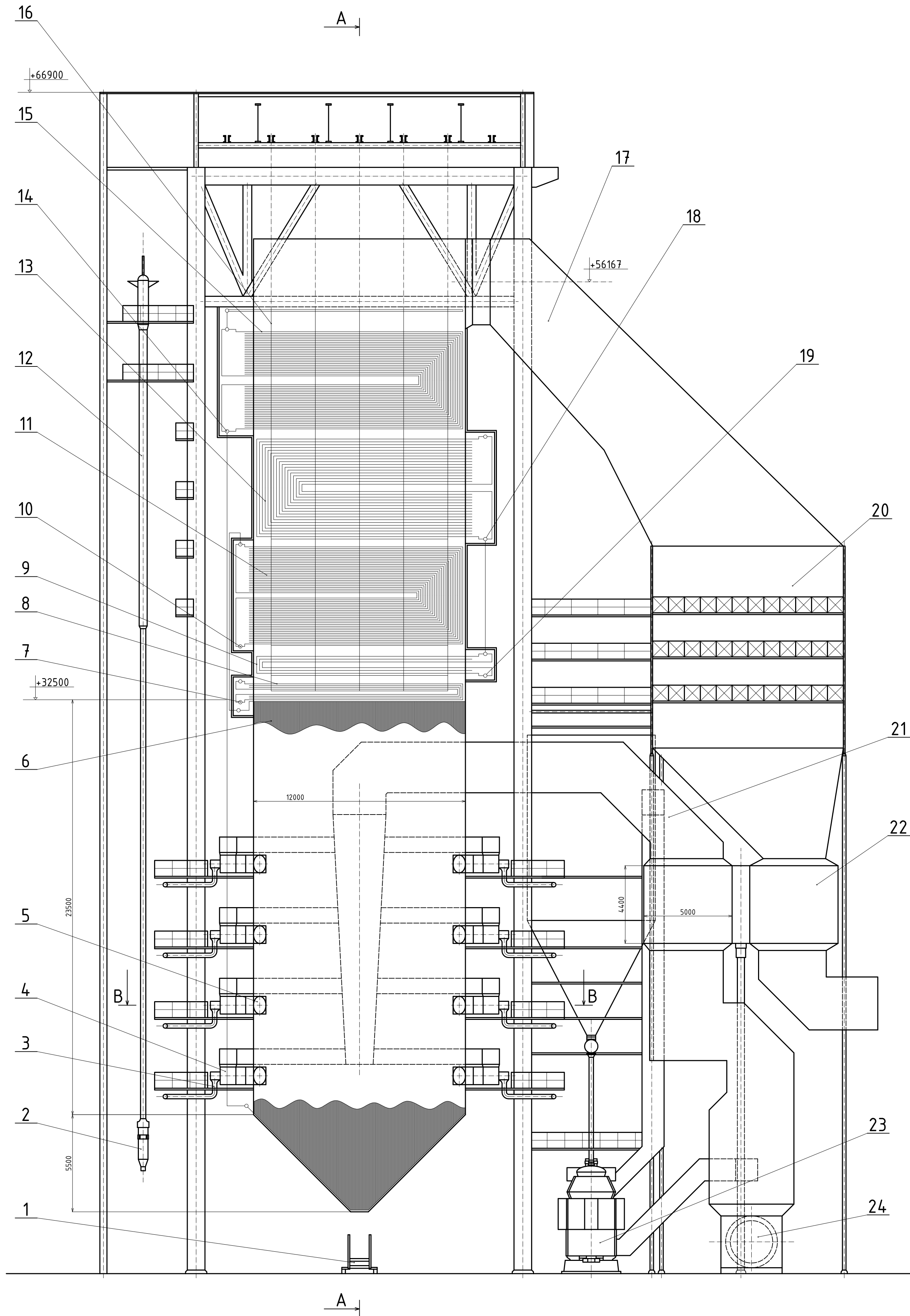
Slika 12 Dijagram temperature dimnih plinova i vode/zraka

PRILOZI

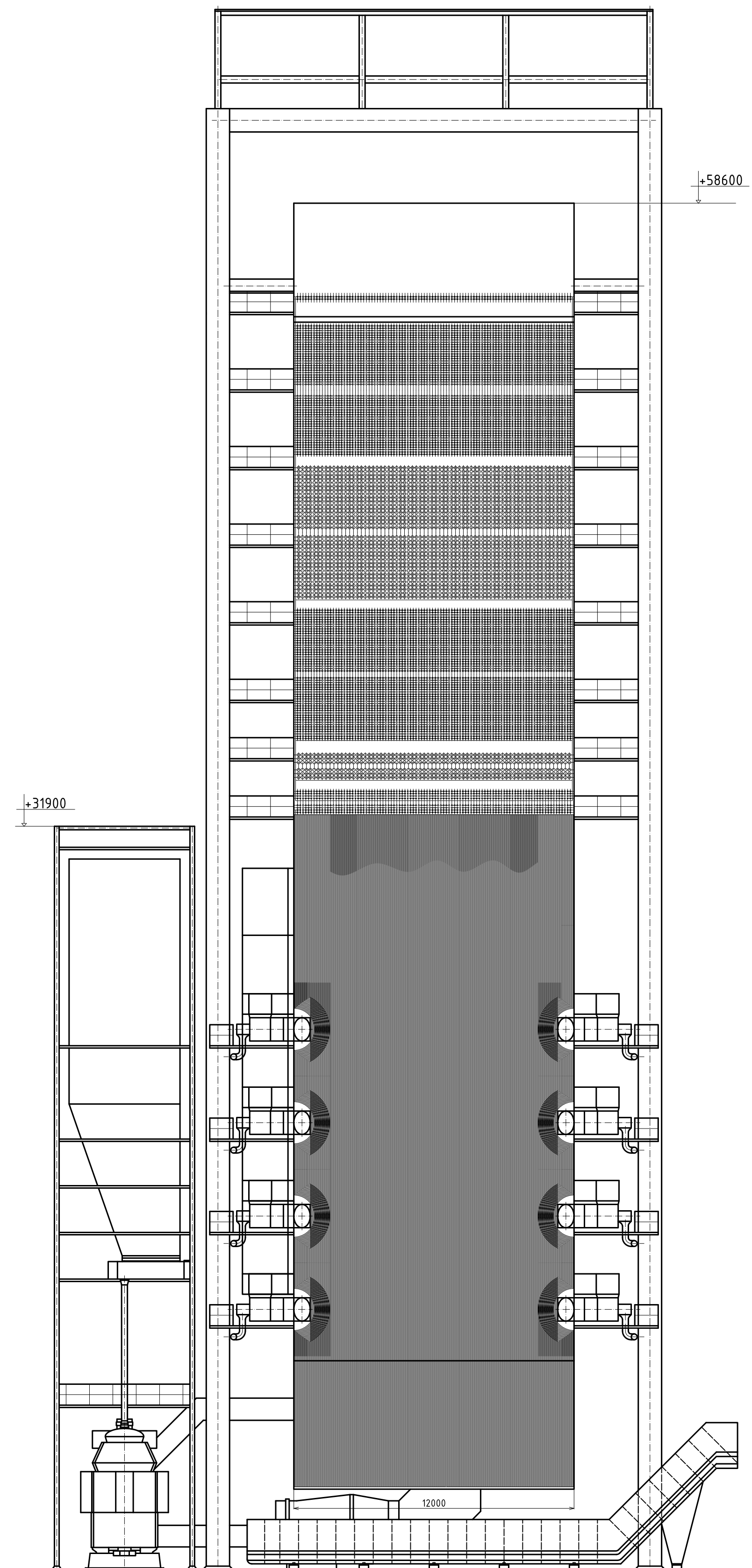
- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

LITERATURA

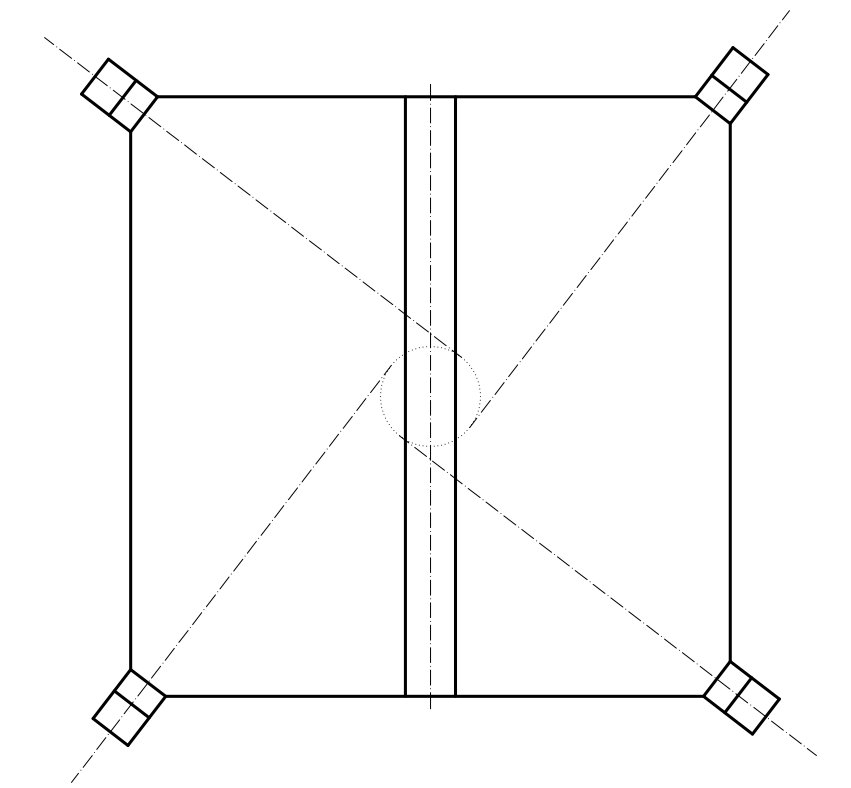
- [1] Kraut, B. : Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1988.
- [2] Kreuh, L. : Generatori pare, Školska knjiga Zagreb, 1978.
- [3] Đurić, B. : Parni kotlovi, Građevinska knjiga Beograd, 1969.
- [4] Susta, M. : Ultra-supercritical Pulverized Coal Fired Power Plants
- [5] Richardson, M. , Shimogori, Y. : Supercritical Boiler Technology Matures
- [6] Gulić, M. : Parni kotlovi, Mašinski fakultet Beograd, 1983.


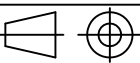


Presjek A-A



Presjek B-B



24	Ventilator za dovod zraka	1				
23	Mlin za ugljen	1				
22	Zagrijač zraka (Ljungstrom)	1				
21	Kanal za dovod zraka	1				
20	DeNOx sistem	1				
19	Sabirna cijev međupregrijača pare 2	1				
18	Sabirna cijev međupregrijača pare 1	1				
17	Kanal za odvod dimnih plinova	1				
16	Noseće cijevi	1				
15	Zagrijač vode	1			Ø64×6×(5400)	
14	Sabirna cijev zagrijača vode	1				
13	Međupregrijač pare 1	1			Ø124×6×(2380)	
12	Sistem za pokretanje	1				
11	Pregrijač pare 1	1			Ø64×6×(5400)	
10	Sabirna cijev pregrijača pare 1	1				
9	Međupregrijač pare 2	1			Ø132×6×(490)	
8	Pregrijač pare 2	1			Ø58×6×(800)	
7	Sabirna cijev pregrijača pare 2	1				
6	Cijevi ekrana ložišta	1200			Ø30×5	
5	Gorionik	16				
4	Cijev za dovod zraka u gorionik	16				
3	Cijev za dovod goriva u gorionik	16				
2	Recirkulacijska pumpa	1				
1	Sistem za odvod pepela	1				
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis	<div> FSB Zagreb</div> <div>Studij strojarstva</div>	
Projektirao		Goran Džepina				
Razradio		Goran Džepina				
Crtao		Goran Džepina				
Pregledao						
Mentor		prof. dr. sc. Daniel Ralph Schneider				
ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj:		
				R. N. broj:		
		Napomena:		Smjer:		Kopija
				Energetski		<div></div>
		Materijal:		Masa:	DIPLOMSKI RAD	
		<div></div> Mjerilo originala		Naziv:		Pozicija:
		GENERATOR PARE				Formal: A1
						Listova: 1
		Crtež broj: 1				List: 1